

L'effet des politiques climatiques sur les énergies renouvelables : une revue des études économétriques

Guillaume Bourgeois, Sandrine Mathy, Philippe Menanteau

▶ **To cite this version:**

Guillaume Bourgeois, Sandrine Mathy, Philippe Menanteau. L'effet des politiques climatiques sur les énergies renouvelables : une revue des études économétriques . Innovations - Revue d'économie et de management de l'innovation, 2017, 54, pp.15-39. 10.3917/inno.054.0015 . hal-01585906

HAL Id: hal-01585906
https://hal.science/hal-01585906

Submitted on 12 Sep 2017

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

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

L'EFFET DES POLITIQUES CLIMATIQUES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES : UNE REVUE DES ETUDES ECONOMETRIQUES

THE EFFECT OF CLIMATE POLICIES ON RENEWABLE ENERGIES: A REVIEW OF ECONOMETRIC STUDIES

Guillaume BOURGEOIS, Sandrine MATHY, Philippe MENANTEAU

Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble

guillaume.bourgeois@univ-grenoble-alpes.fr

sandrine.mathy@univ-grenoble-alpes.fr

philippe.menanteau@univ-grenoble-alpes.fr

juin 2017

Résumé

La limitation du réchauffement climatique nécessite un déploiement rapide et important des énergies renouvelables (ENR). Des politiques de soutien visant l'innovation et la diffusion de ces technologies ont été mises en œuvre depuis plus de 20 ans. Il existe aujourd'hui un débat sur leur efficacité environnementale et économique et sur le bon équilibre entre soutien à l'innovation et à la diffusion. Cet article éclaire les enjeux de ce débat en présentant les résultats de la littérature économétrique qui évalue l'effet de ces politiques et en comparant ces résultats avec les principaux enseignements des études non économétriques. Les résultats montrent que les politiques d'innovation et les politiques de diffusion ont un impact positif sur les ENR et confirment en cela les études non économétriques. Ils font toutefois apparaitre des effets différenciés selon la nature des politiques (politiques prix versus politiques quantités) et la maturité des technologies.

Abstract

The limitation of global warming below 2°C requires rapid and significant deployment of renewable energies in the power sector. Policies to support innovation and diffusion of renewables have been implemented for more than 20 years. There is currently a debate surrounding their economic and environmental efficiency and the right balance between support for innovation and support for diffusion. This article sheds light on the stakes of this debate by presenting the results of the econometric literature which evaluates the effect of these policies and compares these results with the main conclusions of non-econometric studies. The results show that innovation policies and diffusion policies have a positive impact on renewable energies and so confirm non-econometric studies. However, they reveal differentiated effects

depending on the type of policies (price-based policies versus quantity-based policies) and the level of maturity of the technologies.

Mots clés : Politiques publiques, énergies renouvelables, innovation, diffusion, revue de la littérature, études économétriques

Keywords: Public policies, renewable energy, innovation, diffusion, literature review

Code JEL : O30, O31, Q42, Q48, Q55, Q56

INTRODUCTION

Pour limiter le réchauffement climatique à 2°C, les émissions de CO2 du système énergétique mondial devront être nulles dès le courant de la seconde moitié du vingt-et-unième siècle. Le progrès technique dans les technologies bas carbone, essentiellement les énergies nouvelles et renouvelables (ENR) a un rôle essentiel à jouer à cet égard.

Des politiques spécifiques pour inciter à la fois à l'innovation et à la diffusion de ces technologies, ont été mises en œuvre dans un certain nombre de pays. D'un côté, le financement public de la R&D par les incitations fiscales (crédits d'impôts recherche) ou financières (subventions, prêts à taux zéro) qui vise à soutenir l'innovation dans les nouvelles technologies. Et de l'autre, des politiques de soutien à la diffusion qui visent à assurer leur déploiement et sont classiquement organisées en deux catégories : les politiques basées sur les prix et les politiques basées sur les quantités. Dans la première catégorie, les tarifs d'achat garantis (FIT pour *Feed In Tariff*) et les dispositifs de primes ont pour objectif d'inciter les agents à investir dans de nouvelles capacités de production, en garantissant un prix de rachat qui assure la rentabilité des investissements dans un cadre stable et prévisible. Dans la seconde, les politiques basées sur les quantités fixent des objectifs d'intégration des ENR dans le mix énergétique et s'appuient sur des systèmes d'enchères ou des dispositifs de flexibilité tels que les certificats verts (Butler et Neuhoff, 2008; del Río, 2012; Dinica, 2006; Fouquet et Johansson, 2008). Ces instruments "quantités" ont été plus largement employés aux Etats-Unis via les RPS[1], alors que les pays européens ont eu majoritairement recours aux instruments "prix".

Les politiques de soutien à la diffusion visent bien évidemment à inciter les agents économiques à adopter les innovations. Ces politiques peuvent néanmoins avoir un impact sur l'innovation elle-même (*cf.* Figure 1), soit directement si l'amélioration de la rentabilité des projets qui en résulte permet aux développeurs d'investir dans la R&D, soit indirectement, si l'élargissement de la diffusion de la technologie produit de nouvelles innovations par le biais d'effets d'apprentissage par exemple (Menanteau *et al.*, 2003 ; Söderholm et Klaassen, 2007).

[1] Les Renewable Porfolio Standards sont des quotas de production renouvelable généralement associés à un dispositif de flexibilité (type certificats verts)

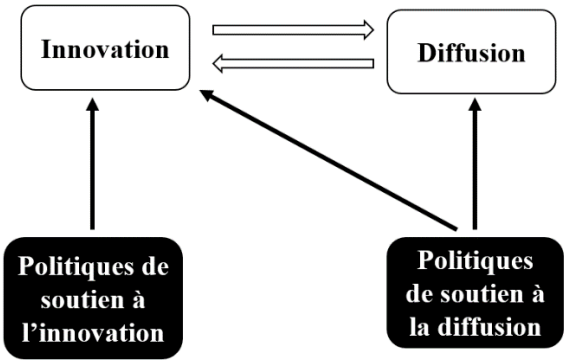


Figure 1 : Impact des politiques de soutien à l'innovation et à la diffusion sur le changement technologique

Il apparaît toutefois nécessaire d'étudier l'efficacité des politiques mises en œuvre dans ce domaine de manière à mieux comprendre les mécanismes en jeu, mais aussi de façon à éclairer la décision publique et constituer un mix de politiques à même de répondre à l'enjeu de décarbonation totale des systèmes techniques. Il existe en effet un débat sur le bon équilibre à établir entre le soutien à la diffusion et le soutien à l'innovation des ENR. Certains auteurs ont ainsi mis en évidence un déséquilibre important en faveur des politiques de diffusion (Zachmann *et al.*, 2015) qui pose la question de la pérennité du processus de changement technologique en cours et de la nécessité, ou non, d'un redéploiement par l'innovation (Dechezleprêtre *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2014)

Cet article vise à éclairer ces enjeux en menant une revue de la littérature empirique, en fort développement dans les dix dernières années, qui traite de l'impact des politiques climatiques sur l'innovation et la diffusion des ENR. Plusieurs méthodologies pour l'analyse de ces impacts ont été déployées: des études de cas (del Río et Gual, 2007 ; Dutra et Szklo, 2008; Lipp, 2007) ou des enquêtes (Burer et Wüstenhagen, 2009; Lüthi et Wüstenhagen, 2012; Masini et Menichetti, 2012) associées ou non à des analyses de statistique descriptive. Notre analyse porte ici principalement sur les travaux cherchant à mettre en avant des régularités plus générales grâce à l'économétrie mais nous rappelons en début de chaque partie les principaux résultats obtenus dans la littérature non économétrique pour chaque type de politique énergie / climat. Plus de 50 études économétriques ont ainsi été identifiées qui se placent en grande majorité à l'échelle nationale.

Les effets des politiques nationales sur l'innovation sont étudiés dans la section 1, en examinant d'abord les politiques ayant un effet direct sur l'innovation (R&D) puis dans un deuxième temps les politiques pouvant impacter indirectement l'innovation (politiques de diffusion par les prix et par les quantités). Dans la section 2, nous étudions les effets des politiques sur la diffusion des technologies en traitant dans une première partie, les politiques de prix (FIT) puis les politiques quantités (RPS, certificats verts). La dernière partie de conclusion discute l'ensemble des résultats fournis par cette revue de littérature, aborde certains aspects méthodologiques et ouvre quelques perspectives de recherche ultérieures.

1. IMPACT DES POLITIQUES ENERGIE / CLIMAT SUR L'INNOVATION DANS LES ENR

Dans la littérature non économétrique, la R&D joue un rôle clé parmi les éléments qui influent sur la direction et le rythme de l'innovation, avec la dynamique d'apprentissage directement liée à la diffusion (Criqui *et al.*, 2000). La question de l'importance relative de ces deux facteurs a été notamment traitée par la littérature sur l'endogénéisation du progrès technique et les courbes d'apprentissage à deux facteurs (Kahouli-Brahmi, 2008 ; Kouvaritakis *et al.*, 2000). Malgré une certaine variabilité, les résultats montrent que les investissements de R&D ont un effet positif sur l'innovation en permettant une baisse du coût des technologies de l'énergie (Kahouli-Brahmi, 2008 ; Jamasb, 2007), en particulier dans les premières phases de développement de la technologie (Grübler *et al.*, 1999). La littérature fait état également de nombreuses synergies et d'effets de feedback entre la R&D, la baisse des coûts et la croissance des capacités. De ce fait, les investissements de R&D sont plus efficaces lorsqu'ils sont complétés par d'autres politiques qui visent notamment à stimuler la demande pour ces technologies (IPCC, 2012 ; Sagar et Van der Zwaan, 2006 ; Neij, 2008).

La littérature confirme également l'impact indirect des politiques de soutien à la diffusion sur la dynamique d'innovation. Selon Canton et Linden (2010), les politiques indifférenciées quant aux technologies ciblées (type RPS), stimulent l'innovation dans les technologies matures et proches de la compétitivité alors que les prix garantis (FIT) sont plus appropriés pour les technologies plus coûteuses. Ceux-ci, en confortant les investisseurs sur la stabilité des marchés à long terme, ont aussi incité à l'innovation sur les technologies de l'éolien (Sawin, 2001; Hvelplund, 2001 ; Lewis et Wiser, 2005). A l'inverse, les politiques quantités (enchères et certificats verts), qui mettent l'accent sur la baisse des prix et la concurrence entre les technologies, ont entravé l'innovation et le développement industriel en Grande Bretagne (Mitchell *et al.*, 2006 ; Butler et Neuhoff, 2008). De façon générale, les politiques prix en renforçant la stabilité et la prévisibilité du marché des nouvelles technologies de l'énergie ont suscité l'intérêt des banques et attiré des capitaux privés vers la R&D, ce que les politiques quantités n'ont pas été en mesure de réaliser (Sawin, 2006). D'après cette littérature, les instruments prix présentent un avantage clair sur les instruments quantités pour inciter à l'innovation.

Ces résultats sont-ils confirmés par la littérature économétrique ? Nous nous appuyons ci-après sur 21 études économétriques qui ont évalué l'impact sur l'innovation dans les ENR, de politiques publiques de soutien à l'innovation, d'une part, et de soutien à la diffusion de l'autre (cf. figure 1). Ces études emploient principalement des modèles de comptage. Certaines réalisent plusieurs régressions économétriques, une par technologie renouvelable étudiée, ce qui fournit à partir de ces 21 études, 41 observations dont 13 concernant les technologies éoliennes et 11 les technologies solaires.

Nous avons choisi de nous focaliser sur les études qui utilisent les brevets comme mesure de l'innovation (qui pourrait être mesurée également par les dépenses de R&D ou le capital humain participant aux activités de recherche). Bien entendu, les brevets ne sont pas la seule façon de protéger une invention et ils présentent des qualités intrinsèques hétérogènes mais l'intérêt de cette méthode est que l'accès aux données de brevets est relativement aisé et qu'ils constituent

par ailleurs un *output* du processus d'innovation contrairement aux dépenses publiques de R&D par exemple. De plus, la classification internationale permet de cibler des champs technologiques particuliers.

Globalement, les articles retenus confirment par exemple que la signature du Protocole de Kyoto a eu un effet déclencheur sur l'adoption dans les pays de politiques de diffusion et/ou d'innovation et impacté positivement l'innovation dans les ENR (Johnstone *et al.*, 2010 ; Nicolli et Vona, 2016 ; Rübbelke et Weiss, 2011). Nesta *et al.* (2014) concluent également à un effet positif mais uniquement sur le dépôt de brevets de faible qualité[2], le dépôt de brevets de qualité élevée ne semblant pas impacté. La raison avancée serait un problème de mauvaise allocation des ressources, les pays fournissant un effort de recherche trop important dans les domaines où ils manquent d'expertise.

Au-delà de ces politiques climatiques, différentes variables de contrôle sont généralement prises en compte, et en particulier le prix de l'électricité qui constitue un indicateur de la rentabilité attendue des investissements en innovation car un investissement dans la technologie génèrera d'autant plus de revenus que le prix de l'électricité est élevé**.** Empiriquement, Johnstone *et al.* (2010) ainsi que Nicolli et Vona (2016) observent que des prix de l'électricité élevés incitent effectivement à l'innovation dans les technologies solaires alors que Johnstone *et al.* (2010), Nicolli et Vona (2016), Rübbelke et Weiss (2011) ainsi que Walz *et al.* (2011) ne trouvent aucun effet sur l'innovation dans l'éolien. Cette différence proviendrait, selon les auteurs, de niveaux de maturité différents entre les deux technologies, la plus grande proximité du coût de l'éolien avec les prix de marché nécessitant un effort d'innovation moins soutenu.

Le nombre total de brevets déposés par un pays, toutes technologies confondues, qui reflète la dynamique globale d'innovation à l'échelle nationale est parfois pris en compte. Il est alors attendu que si le nombre de brevets augmente, le nombre de brevets dans le secteur des ENR augmente également. Cet effet est confirmé par Johnstone *et al.* (2010), Lanzi *et al.* (2012), Lindman et Söderholm (2016), Nesta *et al.* (2014) et Walz *et al.* (2011) pour les technologies éoliennes et solaires.

Le stock de connaissances dans les ENR[3] est également considéré, avec une distinction entre stock domestique et étranger. On observe que le stock existant d'innovations dans les ENR augmente la propension des agents à innover dans ces mêmes technologies, indiquant une certaine dépendance au sentier. Braun *et al.* (2010), Dechezleprêtre et Glachant (2014), Grafström et Lindman (2017) ou Nicolli et Vona (2016) le constatent notamment pour l'éolien et Braun *et al.* (2010) ou Peters *et al.* (2012) pour le solaire.

[2] La qualité est mesurée en pondérant chaque brevet par la taille de sa famille (nombre d'offices dans lesquels l'innovation a été brevetée) ou en ne considérant que les brevets triadiques c'est-à-dire ceux qui sont déposés dans les trois principaux offices de brevet : l'office américain, l'office européen et l'office japonais

[3]Le stock de connaissances intègre un effet d'obsolescence calculé en actualisant le nombre de brevets déposés (Bosetti *et al.*, 2008; Buonanno *et al.*, 2003) en général à 15% (Grafström et Lindman, 2017).

Tableau 1 : Etudes économétriques évaluant l'impact des politiques de soutien à l'innovation et à la diffusion sur l'innovation dans les ENR

Reference	Tech	Periode	Couv.geo	dfit	mfit	drps	mrps	mrd	inc	fisc	cap
Boehringer et al. (2014)	T	1990-2009	Allemagne					1			1
Boehringer et al. (2014)	T	2000-2009	Allemagne		0			0			
Braun et al. (2010)	E	1978-2004	OCDE	0		0		1			
Braun et al. (2010)	S	1978-2004	OCDE	0		0		1			
Choi et Anadon (2014)	S	2001-2009	OCDE+ Chine		1	0		0			
Dalmazzone et Corsatea (2012)	B	1997-2007	Italie					1			0
Dalmazzone et Corsatea (2012)	E	1997-2007	Italie					1			1
Dalmazzone et Corsatea (2012)	S	1997-2007	Italie					1			0
Dalmazzone et Corsatea (2012)	T	1997-2007	Italie					1			1
Dechezleprêtre et Glachant (2014)	E	1991-2008	79 pays					1			
Emodi et al. (2015)	E	1997-2011	OCDE	0				0			
Emodi et al. (2015)	S	1997-2011	OCDE	0				0			
Grafström et Lindman (2017)	E	1991-2008	Europe		0			0			
Johnstone et al. (2010)	B	1978-2003	OCDE		0		0	0	0	0	
Johnstone et al. (2010)	E	1978-2003	OCDE		0		1	1	0	0	
Johnstone et al. (2010)	S	1978-2003	OCDE		1		0	1	0	0	
Johnstone et al. (2010)	T	1978-2003	OCDE		1		1	1	1	0	
Kim et al. (2015)	E	1991-2006	OCDE	1		2		1	2	0	1
Kim et al. (2017)	S	1992-2007	OCDE	1		0		1	2	0	1
Kim et Kim (2015)	E	1991-2007 (solaire)	OCDE	1		0		1	0	2	
Kim et Kim (2015)	S	1997-2008 (éolien)	OCDE	1		0		1	0	0	
Kruse et Wetzel (2014)	E	1978-2009	OCDE					1			
Kruse et Wetzel (2014)	S	1978-2009	OCDE					0			
Lanzi et al. (2012)	T	1978-2008	OCDE					1			
Liang et Fiorino (2013)	T	1974-2009	USA					1			
Lindman et Söderholm (2016)	E	1977-2009	Europe		1			1			
Nesta et al. (2014)	T	1976-2007	OCDE					0			
Nicolli et Vona (2016)	B	1980-2007	Europe		0		0	1			
Nicolli et Vona (2016)	E	1980-2007	Europe		0		1	1			
Nicolli et Vona (2016)	S PV	1980-2007	Europe		1		0	0			
Nicolli et Vona (2016)	S Th	1980-2007	Europe		0		1	0			
Peters et al. (2012)	S	1978-2005	OCDE					1			1
Rexhäuser et Löschel (2015)	T	1992-2009	Allemagne					0			
Rübbelke et Weiss (2011)	E	1980-2008	OCDE		1			1	1	1	
Vincenzi et Ozabaci (2017)	S	1990-2008	OCDE		1		0	1			
Walz et al. (2011)	E	1991-2007	OCDE	0		1		1			

Légende :
E : Eolien ; S : Solaire ; B : Biomasse ; G : Géothermie ; S PV = Solaire Photovoltaïque ; S Th= Solaire Thermique ;
H : Hydraulique ; M : énergie Marines ; T : toutes les ENR

dfit, mfit : mesure d'une politique prix avec respectivement une variable dummy et avec le montant du FIT

drps, mrps : mesure d'une politique quantité avec respectivement une variable dummy et avec le % de pénétration des ENR requis

mrd : Montant des dépenses publiques de R&D dans la(les) technologie(s) étudié(es)

inc : incitations financière (subvention, prêts à taux zéro)

fisc : Incitations fiscales : crédits d'impôt

cap : capacités installées (mesure de la diffusion des technologies ENR)

0 : effet non significatif
1 : effet significativement positif
2 : effet significativement négatif

1.1. Impact des politiques de soutien direct à l'innovation

L'effet des dépenses de R&D publiques est largement étudié dans la littérature empirique à la différence d'autres politiques de soutien à l'innovation comme les crédits d'impôts ou les subventions. Les dépenses de R&D privées qui ne sont pas disponibles à un niveau sectoriel désagrégé, ne sont pas directement prises en compte dans ces travaux mais on peut faire l'hypothèse d'un lien entre dépenses publiques et dépenses privées de R&D, l'impact sur l'innovation étant *in fine* imputable à l'une et à l'autre.

L'effet attendu des politiques publiques de R&D est une incitation des agents à innover qui se traduit par un accroissement du nombre de brevets déposés. Globalement, les estimations empiriques confirment cela pour l'ensemble des ENR avec un effet particulièrement marqué pour les technologies solaire et éolienne (Figure 2).

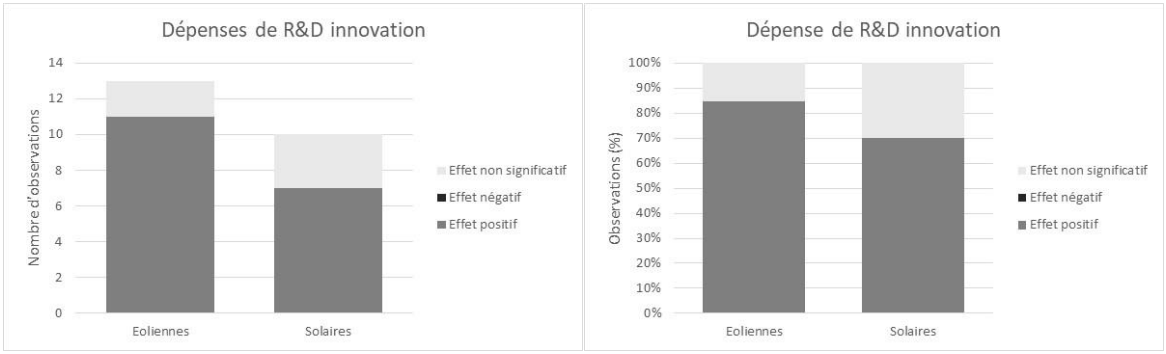


Figure 2 : Effet des dépenses publiques de R&D sur l'innovation dans les énergies éoliennes et solaires

Parmi d'autres, Dalmazzone et Corsatea (2012), Lanzi *et al.* (2012), Peters *et al.* (2012), Rübbelke et Weiss (2011), Walz *et al.* (2011), Boehringer *et al.* (2014) observent un effet positif des dépenses publiques de R&D sur l'innovation dans les ENR (en particulier pour les énergies

solaires et éoliennes). Cependant, quelques études concluent à un effet non significatif (Boehringer *et al.*, 2014; Emodi *et al.*, 2015; Nesta *et al.*, 2014; Rexhäuser et Löschel, 2015)[4].

Certaines études s'intéressent également aux effets des dépenses de R&D étrangères et donc aux effets de *spillovers* entre pays. L'accroissement des dépenses de R&D dans un pays A doit induire une hausse des innovations ainsi qu'une augmentation du stock de connaissances dans ce pays et donc des flux de connaissances plus importants vers le pays B. L'effet de cet accroissement du stock de connaissance est toutefois moins important, pour le pays B, que l'effet des dépenses de R&D domestiques, du fait de l'existence de barrières à la diffusion des connaissances (Jaffe *et al.*, 1993). Pour les technologies solaires et éoliennes (Peters *et al.*, 2012; Lindman et Söderholm, 2016) ne trouvent toutefois aucun effet des dépenses de R&D réalisées à l'étranger. Mais ce résultat serait selon eux à considérer avec prudence du fait de problèmes de corrélation entre variables qui pourraient expliquer l'absence d'impact significatif des dépenses de R&D réalisées à l'étranger.

1.2. Impact sur l'innovation des politiques de diffusion basées sur les prix

L'objectif premier des politiques de diffusion n'est pas d'inciter les agents à innover mais comme le montre la littérature non économétrique, celles-ci peuvent avoir un effet indirect sur l'innovation dans les ENR en améliorant les perspectives de rentabilité et le déploiement de la technologie.

La Figure 3 présente une synthèse du tableau 1 sur l'effet des politiques prix sur l'innovation dans les technologies éoliennes et solaires. On observe des effets très contrastés entre l'éolien et le solaire. Si une nette majorité d'études fait apparaître un effet positif des politiques prix sur l'innovation pour les technologies solaires (6 études économétriques soit 75% des observations), ce n'est pas le cas pour les technologies éoliennes (4 études soit 40% des observations).

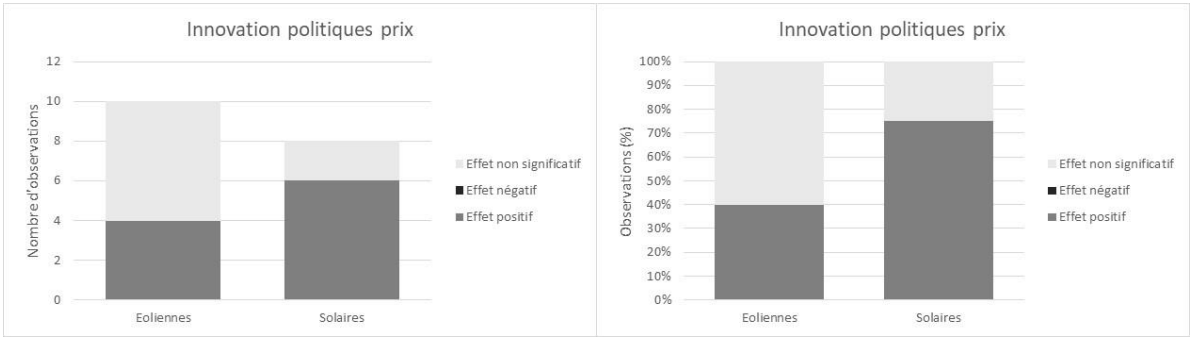


Figure 3 : Effet sur l'innovation des politiques basées sur les prix pour les technologies éolienne et solaire

[4] Il est important de constater que deux de ces études (Boehringer *et al.*, 2014 ; Rexhäuser and Löschel, 2015) s'intéressent à l'innovation en Allemagne uniquement. Il serait ainsi intéressant d'approfondir ces analyses sur ce pays afin de mieux comprendre les mécanismes d'incitation à l'innovation et de mieux comprendre les interactions entre politiques de diffusion et politiques d'innovation .

Selon certains auteurs, cette différence d'impact sur l'innovation entre les technologies éolienne et solaire s'explique par la différence de maturité entre ces filières qui justifierait un effort de R&D moindre pour les technologies les plus proches de la compétitivité économique.

Les auteurs qui n'observent pas d'effet significatif des politiques prix sur l'innovation pour le solaire utilisent une variable dummy (Braun et al., 2010 ; Emodi et al., 2015). En revanche, Choi et Anadón (2014) ; Johnstone *et al.*, (2010) ; Nicolli et Vona (2016) ainsi que Vincenzi et Ozabaci (2017), obtiennent des effets positifs de ces mêmes politiques sur le solaire mais utilisent pour cela une variable plus précise comme mesure de la politique (le montant du FIT). Les résultats obtenus dépendent donc en partie de la façon dont sont définis le modèle économétrique et les variables de politiques, une plus grande précision dans la caractérisation des politiques conduisant à des résultats plus nettement favorables.

De même, l'absence de précision dans la caractérisation des technologies conduit à des résultats non significatifs. Boehringer *et al.* (2014) concluent à l'absence d'impact des FIT sur l'innovation en considérant l'ensemble des technologies ENR. La raison invoquée renvoie au fait qu'une politique "prix" va plutôt conduire à des innovations incrémentales par le *learning-by-doing*, alors que les brevets concernent plutôt des innovations de rupture, étant donné les coûts engendrés par leur dépôt et la possibilité d'avoir recours à d'autres moyens de protection d'une innovation (Boehringer *et al.*, 2014).

D'une certaine façon, l'absence d'effet significatif observé par Johnstone et al. (2010) ainsi que Nicolli et Vona (2016) pour les technologies de la biomasse peut s'expliquer également par une caractérisation trop imprécise d'une famille qui regroupe des technologies assez différentes les unes des autres.

1.3. Impact sur l'innovation des politiques de diffusion basées sur les quantités

Les études sont ici moins nombreuses que pour la catégorie précédente et présentent des résultats très contrastés. Elles tendent à montrer que les politiques quantités sont plus efficaces pour inciter à l'innovation dans l'éolien que dans le solaire comme le montre la Figure 4 ci-dessous. La totalité des études qui évaluent l'effet des politiques quantités sur l'innovation dans le solaire observent un effet non significatif alors que la moitié des études qui concernent l'énergie éolienne conclue à un effet significativement positif.

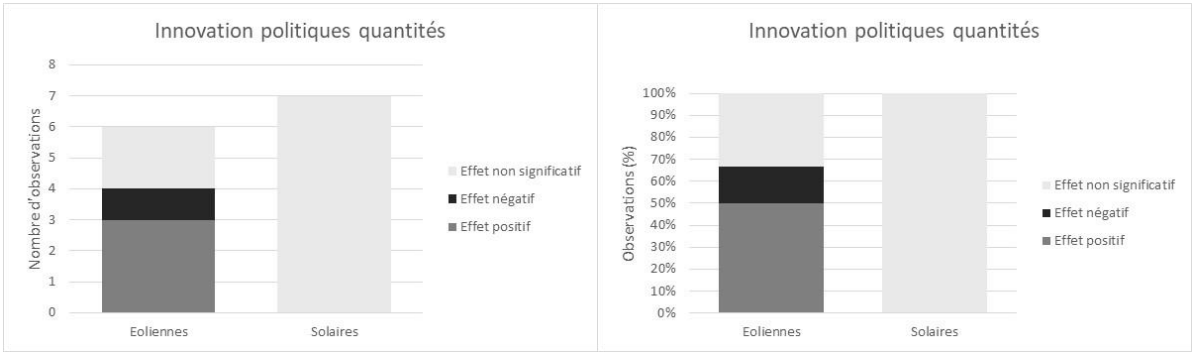


Figure 4 : Effet sur l'innovation des politiques basées sur les quantités pour les technologies éolienne et solaire

Pour Johnstone *et al.* (2010) ainsi que Nicolli et Vona (2016) les politiques quantités favorisent l'innovation dans l'éolien mais n'ont aucun effet significatif sur l'innovation dans le solaire. Pour Braun *et al.* (2010), qui utilisent une variable dummy, ces politiques quantités n'ont pas plus d'effet sur l'innovation dans les technologies solaires que dans les énergies éoliennes. [5]

La principale raison invoquée est que les politiques quantités, en introduisant une concurrence entre les différentes ENR, favorisent les moins coûteuses et les plus matures comme les énergies éoliennes. Ces dispositifs n'offriraient pas de débouchés suffisants aux technologies encore trop peu compétitives comme le solaire et n'inciteraient donc pas à l'innovation.

A l'inverse l'absence d'effet positif sur les technologies de la biomasse observée par certains auteurs (Johnstone *et al.*, 2010 ; Nicolli et Vona, 2016) peut être à rechercher du côté de la trop grande maturité de ces technologies et de perspectives de progrès technique jugées par les acteurs trop limitées.

2. L'IMPACT DES POLITIQUES CLIMATIQUES SUR LA DIFFUSION DES TECHNOLOGIES

La littérature non économétrique sur l'impact des politiques de soutien à la diffusion des ENR est importante et comprend des études de cas nationales, des analyses comparatives entre plusieurs pays, et des travaux plus théoriques. Les unes et les autres concluent de façon générale à la supériorité des tarifs d'achat sur les dispositifs de quotas échangeables pour l'accroissement des capacités de production ainsi que pour l'efficacité économique.

Klessman *et al.* (2011) observent ainsi que les pays qui présentent la plus grande efficacité des politiques ont tous utilisé des prix garantis alors qu'à l'inverse, les performances sont moindres dans les pays ayant adopté des dispositifs de quotas. Stern (2007) conclut, avec d'autres (EC, 2008 ; Ragwitz et al., 2007 ; del Rio & Bleda, 2012 ; IEA, 2008 ; Resch *et al.*, 2009), que les mécanismes de prix permettent d'atteindre une pénétration des renouvelables plus importante et à moindre coût que les quotas et les dispositifs d'enchères. Cela est notamment lié au fait que la stabilité qu'ils apportent est plus importante que celle amenée par les politiques quantités (Haas *et al.*, 2011, Menanteau *et al.*, 2003).

Ces résultats sont confirmés par les analyses empiriques portant sur un ou plusieurs pays. Verbruggen et Lauber (2012) pour la Belgique, Butler et Neuhoff (2008) ou Mitchell *et al.* (2006) pour la Grande Bretagne et l'Allemagne, confirment la plus grande efficacité des systèmes de prix face aux quotas échangeables. Pour les Etats Unis, qui n'ont utilisé que des dispositifs de quotas, les résultats sont plus nuancés, l'efficacité des dispositifs de quotas n'étant avérée que dans certains Etats (van der Linden *et al.*, 2005 ou Wiser *et al.*, 2007).

[5] Kim *et al.* (2017) observent même un effet négatif des politiques quantités sur l'innovation dans l'éolienne (et un effet non significatif sur l'innovation dans le solaire).

Dans cette seconde partie, nous présentons les résultats des études économétriques qui portent sur l'évaluation de l'impact des politiques climatiques sur la diffusion des technologies d'énergie renouvelable. Nous nous basons pour cela sur 35 études économétriques qui comportent au total 55 observations dont 19 pour les technologies éoliennes et 12 pour les technologies solaires (Tableau 2). Des modèles de panel sont majoritairement utilisés. La diffusion y est mesurée principalement grâce à deux indicateurs: la production issue d'ENR (énergie) ou les capacités installées de production d'ENR (puissance). Ces indicateurs sont exprimés en valeur absolue ou en pourcentage du mix énergétique.

Les variables de contrôle prises en compte dans ces études économétriques sont multiples : les facteurs économiques reflétant la plus forte propension des pays riches à favoriser les nouvelles technologies (Romano *et al.*, 2017), la dépendance aux énergies fossiles (Bolkesjø *et al.*, 2014; Carley, 2009; Jenner *et al.*, 2013; Marques et Fuinhas, 2012), la densité de population limitant la place disponible pour développer les ENR (Adelaja *et al.*, 2010; Hitaj, 2013), les facteurs politiques mesurant le degré de conscience environnementale des élus (Carley, 2009) ou la couleur politique du gouvernement (Adelaja *et al.*, 2010).

Outre l'effet des politiques ciblées sur les ENR, celui de l'augmentation du prix de l'électricité sur la diffusion est également analysé. Si des prix déjà élevés peuvent inhiber les investissements dans des moyens de production encore plus onéreux, on attend qu'une augmentation du prix de l'électricité améliore la rentabilité relative de la production renouvelable (Carley, 2009). Et, de manière générale, les études montrent un effet positif d'une augmentation du prix sur la diffusion des ENR (Dijkgraaf *et al.*, 2014; Gavard, 2016; Romano *et al.*, 2017).

Tableau 2:Etudes économétriques évaluant l'impact des politiques de soutien à l'innovation et à la diffusion sur la diffusion des ENR au sein des pays

Reference	Tech	Periode	Couv.geo	dfit	mfit	sfit	drps	mrps	isirps	rpst	inc	fisc
Adelaja et al. (2010)	E	2000	USA				1	1		1	2	
Aguirre et Ibikunle (2014)	T	1990-2010	38 pays								0	2
Bolkesjø et al. (2014)	E	1990-2012	Europe			1			0			
Bolkesjø et al. (2014)	S	1990-2012	Europe			1			0			
Bolkesjø et al. (2014)	B	1990-2012	Europe			0			1			
Bowen et Lacombe (2015)	T	1990-2012	USA						1		0	
Carley (2009)	T	1998-2006	USA				1				0	
Carley et al. 2016	T	1990-2010	164 pays	1			1				0	
Choi et Anadon (2014)	S	2001-2009	OCDE		1		0					
del Río et Tarancón (2012)	E	2006	Europe	0		0						
Delmas et Montes-Sancho (2011)	T	1998-2007	USA				1				0	
Dijkgraaf et al. (2014)	S	1990-2011	OCDE		1							
Dong (2012)	E	2005-2009	53 pays	1			0					
Gavard (2016)	E	2000-2010	Danemark	1	1							
Grafström et Lindman (2017)	E	1991-2008	Europe		1							
Hitaj (2013)	E	1998-2007	USA					0			1	1
Hitaj et al. (2014)	E	1996-2010	Allemagne		1							
Jenner et al. (2013)	E	1992-2008	Europe	1		1			0			0
Jenner et al. (2013)	S	1992-2008	Europe	0		1			0			0
Kilinc-ata (2016)	T	1990-2008	Europe + USA	1			0					1
Kim et al. (2015)	S	1992-2007	OCDE	1			0				2	2
Kim et al. (2015)	E	1991-2006	OCDE	0			1				1	2
Krasko et Doris (2013)	S	2010	USA							1		
Li et al. (2017)	E	1996-2013	Europe	1			1				1	1
Li et al. (2017)	S	1996-2013	Europe	1			0				0	0
Menz et Vachon (2006)	E	1998-2003	USA				1			1		
Nicollini et Tavoni (2017)	T	2000-2010	Europe		1						1	
Polzin et al. (2015)	T	2003-2011	OCDE								0	1
Polzin et al. (2015)	E	2003-2011	OCDE								0	0
Polzin et al. (2015)	S	2003-2011	OCDE								1	0
Polzin et al. (2015)	B	2003-2011	OCDE								1	0
Popp et al. (2011)	E	1991-2004	OCDE		0			0				
Popp et al. (2011)	B	1991-2004	OCDE		0			0				
Romano et al. (2017)	T	2004-2011	22 pays (PED)	2			1				2	1
Romano et al. (2017)	T	2004-2011	34 pays (ind.)	2			2				0	1

Reference	Tech	Periode	Couv.geo	dfit	mfit	sfit	drps	mrps	isirps	rpst	inc	fisc
Sarzynski et al. (2012)	S	1997-2009	USA				1			1	1	0
Schmid (2012)	T	2001-2009	Inde		0							
Shrimali et al. (2015)	T	1991-2010	USA						1		0	
Shrimali et al. (2012)	T	1990-2010	USA						0		0	
Shrimali et al. (2012)	B	1990-2010	USA						0		1	
Shrimali et al. (2012)	G	1990-2010	USA						0		0	
Shrimali et al. (2012)	S	1990-2010	USA						0		0	
Shrimali et al. (2012)	E	1990-2010	USA						0		0	
Shrimali et Jenner (2013)	S	1998-2009	USA				0					0
Shrimali et Kniefel (2011)	T	1991-2007	USA					1			1	
Shrimali et Kniefel (2011)	E	1991-2007	USA					0			1	
Shrimali et Kniefel (2011)	S	1991-2007	USA					1			0	
Shrimali et Kniefel (2011)	B	1991-2007	USA					2			1	
Shrimali et Kniefel (2011)	G	1991-2007	USA					1			1	
Smith and Urpelainen (2014)	T	1979-2005	OCDE		1							
Smith and Urpelainen (2014)	E	1979-2005	OCDE		1							
Yin et Powers (2010)	T	1993-2006	USA				0	2	1	0	0	
Zhang (2013)	E	1991-2010	Europe		0							
Zhao et al. (2013)	B	1980-2010	122 pays	1			1				1	1
Zhao et al. (2013)	E	1980-2010	122 pays	1			2				1	0

Légende :
E : Eolien ; S : Solaire ; B : Biomasse ; G : Géothermie ; S PV = Solaire Photovoltaïque ; S Th= Solaire Thermique ;
H : Hydraulique ; M : énergie Marines ; T : toutes les ENR

dfit, mfit : mesure d'une politique prix avec respectivement une variable dummy et avec le montant du FIT

drps, mrps : mesure d'une politique quantité avec respectivement une variable dummy et avec le % de pénétration des ENR requis

mrd : Montant des dépenses publiques de R&D dans la(les) technologie(s) étudié(es)

inc : incitations financière (subvention, prêts à taux zéro)

fisc : Incitations fiscales : crédits d'impôt
cap : capacités installées (mesure de la diffusion des technologies ENR)

0 : effet non significatif
1 : effet significativement positif
2 : effet significativement négatif

2.1. Impact des politiques basées sur des prix sur la diffusion

Quinze études économétriques qui analysent l'impact des politiques prix sur la diffusion des ENR ont été recensées. La plupart concerne les pays développés ou de l'OCDE et quelques-unes prennent en compte des pays en développement (Carley *et al.*, 2016 ; Dong, 2012 ; Schmid, 2012 ; Romano *et al.*, 2017 ; Zhao *et al.*, 2013). Nous concentrons notre analyse sur l'éolien et le solaire, les autres technologies ayant été peu couvertes dans la littérature. Mentionnons pour mémoire, la variable agrégées (Toutes) qui intègre l'ensemble des ENR et présente des résultats très contrasté (Figure 5) en raison certainement de son caractère indifférencié.

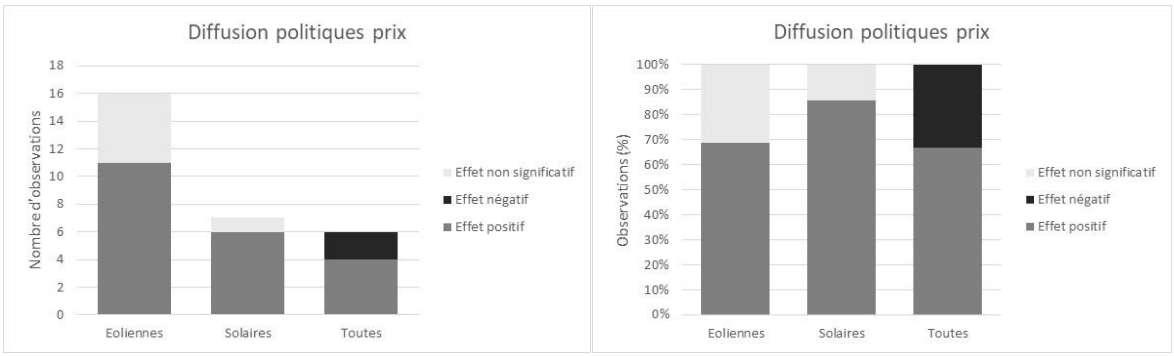


Figure 5: Effet sur la diffusion des politiques prix pour les technologies éolienne, solaire et ENR

Malgré un plus faible nombre d'études pour les technologies solaires, les résultats font clairement apparaître un effet positif de l'introduction des dispositifs de prix garantis sur la diffusion des ENR.

Pour le solaire, la quasi-totalité des études que nous avons identifiées montre un effet positif significatif pour les politiques prix (Bolkesjø *et al.*, 2014; Dijkgraaf *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017). Les résultats apparaissent également majoritairement positifs pour les technologies éoliennes (Dong, 2012; Hitaj *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017) ou éventuellement positifs mais non significatifs (Popp *et al.*, 2011; Zhang, 2013). Le principal argument utilisé pour expliquer un effet non significatif est que les technologies éoliennes, plus matures que les technologies solaires, sont d'ores et déjà proches de la compétitivité. Une politique de diffusion basée sur les prix, ne serait alors plus aussi indispensable qu'elle peut l'être pour des technologies moins matures (photovoltaïque par exemple). Certains auteurs évoquent également l'effet contre-incitatif que créeraient des prix d'achats élevés soupçonnés d'être non pérennes par les agents (Popp *et al.*, 2011; Zhang, 2013).

Au-delà de ces effets généraux, les résultats des études économétriques apportent des enseignements intéressants sur l'influence des éléments de design dans les modèles

économétriques. Ainsi, Jenner *et al.* (2013) définissent un indicateur qu'ils nomment SFIT[6] et qui permet de prendre en compte la différence entre le montant du prix d'achat et le coût de production ainsi que la durée du contrat. Alors qu'une dummy conduit à un impact non significatif pour le solaire, la prise en compte de l'indicateur SFIT fait apparaître un impact significativement positif : une augmentation de 10 points de pourcentage du SFIT impliquant une croissance des nouvelles capacités solaires de 5,6% pour Jenner *et al.* (2013) et de 18,71% pour Bolkesjø *et al.* (2014).

Dans le même esprit, alors qu'avec le seul montant du tarif comme élément de design, Zhang (2013) ne trouve aucun effet significatif du tarif d'achat sur l'innovation pour l'éolien, l'inclusion dans le modèle de la durée du contrat de rachat (en années) et d'une dummy pour l'existence d'une obligation d'achat conduisent à un effet positif de la politique sur la diffusion de l'éolien : une prolongation de 1 % de la durée du contrat augmente les installations annuelles de 0,3 %. Zhang (2013) explique ce résultat par le fait que, toutes choses étant égales par ailleurs, l'augmentation de la durée du contrat permettrait de réduire l'incertitude sur la rentabilité des investissements dans de nouvelles capacités de production. Dijkgraaf *et al.* (2014) trouvent également un effet positif de la durée du contrat sur la diffusion des technologies photovoltaïques. La stabilité de la politique qui apparait comme un élément déterminant sur l'adoption des ENR dans de nombreuses études de cas est peu documentée dans la littérature économétrique, mais néanmoins confirmée par del Río et Tarancón (2012) et Dijkgraaf *et al.*, (2014).

Gavard (2016) compare enfin l'effet d'une politique de prix garantis avec une politique de type « premium[7] » sur la diffusion des énergies éoliennes et observe que la première est plus efficace pour assurer le déploiement de l'éolien car il limite le risque subi par les investisseurs par rapport à un dispositif de premium qui expose le producteur à la variabilité des prix sur le marché de gros de l'électricité.

2.2. Impact des politiques basées sur des quantités sur la diffusion

Vingt-deux études économétriques traitant des politiques quantités ont été identifiées dont une grande majorité concerne les États-Unis puisque les instruments quantités y ont été largement utilisés. Popp *et al.* (2011) ainsi que Dong (2012) analysent respectivement des données de 26 pays de l'OCDE et de 53 pays différents (liste non précisée dans le papier). Romano *et al.* (2017) s'intéressent à 56 pays développés et en développement. Peu d'analyses couvrent l'Union Européenne (Bolkesjø *et al.*, 2014 ; Jenner *et al.* 2013 ;li *et al.*, 2017). Les résultats obtenus pour l'éolien et le solaire sont synthétisés sur la Figure 6

[6] Plus précisément, cet indicateur mesure le ratio du profit par kWh produit (en prenant en compte le montant du tarif) sur le coût total unitaire de production.

[7] Avec une politique « premium », le producteur d'ENR est rémunéré par la vente d'électricité sur le marché de gros (prix variables) et par une prime fixe.

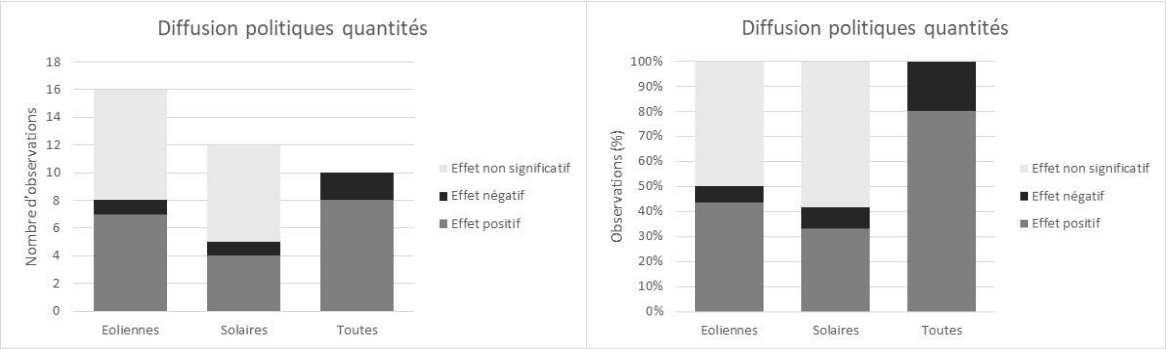


Figure 6 : Effet sur la diffusion des politiques quantités pour les technologies éolienne, solaire et ENR

Les résultats confirment ce qu'indiquent les études non économétriques qui comparent l'efficacité des politiques de soutien aux renouvelables : les politiques prix présentent de manière générale une plus grande efficacité que les politiques quantités. On observe ainsi que la proportion des études qui fait apparaître des effets positifs de la mise en œuvre de politiques quantités est sensiblement plus faible que pour les instruments prix (cf. Figure 5). Cette proportion est plus faible encore pour les technologies solaires, ce que les études non économétriques ont bien souligné[8].

Parmi les instruments quantités, les certificats verts ont été relativement peu utilisés en Europe et ils semblent avoir peu contribué à la diffusion du solaire et de l'éolien. Dans le cas du solaire, l'effet de ces politiques n'est pas significatif (Jenner *et al.* 2013; Bolkesjø *et al.*, 2014) et, il ne l'est pas non plus pour l'éolien selon Jenner *et al.* (2013) ou Bolkesjø *et al.* (2014) si on examine l'indicateur ISI *(Incremental Share Indicator)* qui mesure la différence entre la pénétration à une date t des ENR et l'objectif fixé par la politique quantité. Ce résultat est confirmé par Popp *et al.* (2011) ainsi que par Dong (2012). Ce manque d'effet significatif des dispositifs de certificats verts est toutefois probablement lié à leur faible utilisation en Europe où d'autres politiques quantités comme les appels d'offres ont été privilégiées.

Les effets des politiques de diffusion basées sur des quantités sont plus apparents aux États-Unis où ils ont été plus systématiquement utilisés sous la forme de dispositifs de RPS et sur une période plus longue: ainsi, en 2009, 31 Etats des Etats-Unis utilisaient une politique de type RPS (Carley, 2009). Les instruments quantité ont également été utilisés en Europe mais sous la forme de système d'enchères et dans 5 pays seulement: Royaume-Uni, Irlande, France, Portugal, Lettonie (Jenner *et al.*, 2013).

Aux Etats-Unis, l'impact sur la diffusion est clairement positif (Adelaja et al., 2010; Bowen and Lacombe, 2015; Delmas and Montes-Sancho, 2011; Krasko and Doris, 2013; Sarzynski et al., 2012) ou plus rarement non significatif (Shrimali et Jenner, 2013). Adelaja *et al.* (2010); Menz et Vachon (2006) montrent ainsi un effet positif des politiques RPS sur la diffusion de l'énergie éolienne. Avec un dispositif de soutien comme le RPS qui met en concurrence les

[8] On observe comme pour les politiques prix que l'impact des politiques quantités sur la totalité des technologies ENR conduit à des résultats contrastés, avec une forte proportion de résultats positifs mais également des résultats négatifs qu'il est difficile d'expliquer.

technologies quel que soit leur niveau de maturité, les résultats sont beaucoup moins favorables pour le solaire en raison de son coût plus élevé. Certains auteurs, tels que Shrimali et al, (2011) et Sarynski et al (2012) obtiennent néanmoins des résultats positifs mais ne proposent pas d'explication à ce résultat qui peut tenir à la nature spécifique des programmes considérés (politiques quantités ciblées sur la technologie solaire par exemple).

L'expérience des Etats Unis qui n'ont pas utilisé les politiques prix, rappelons-le, atteste du fait que les politiques quantités peuvent également stimuler la diffusion alors qu'en Europe le retour d'expérience est plus controversé. L'expérience accumulée sur ces dispositifs se révèle également un élément important puisque certains auteurs observent que le nombre d'années depuis la mise en place de la politique a un effet sur la diffusion des technologies renouvelables aux Etats-Unis (Adelaja *et al.*, 2010 ; Menz et Vachon, 2006; Sarzynski *et al.*, 2012).

Enfin, quelques études ont évalué l'effet des appels d'offres sur la diffusion des ENR (Bolkesjø et al., 2014; Jenner et al., 2013; Kilinc-Ata, 2016) avec des résultats mitigés : positifs et significatifs pour Kilinc-Ata (2016) sans distinction entre les technologies, positifs également pour l'éolien mais non significatifs pour le solaire et la biomasse selon Bolkesjø *et al.* (2014). La période considérée explique ici certainement les résultats, les premiers dispositifs d'enchères utilisés en Europe ayant produit des effets très peu significatifs en termes de capacités installées alors que les appels d'offres récents, pour l'éolien offshore ou pour les centrales PV au sol semblent bien plus efficaces.

3. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Cet article propose une synthèse des principales études économétriques sur l'effet des politiques de soutien à l'innovation et à la diffusion dans le domaine des ENR. Il fait ressortir les résultats de ces travaux et fait ressortir leur convergence avec les conclusions de la littérature non économétrique sur l'impact de ces politiques.

Comme attendu, les études économétriques confirment l'impact des dépenses publiques domestiques de R&D sur l'innovation, mesurée par le nombre de brevets, pour l'ensemble des technologies renouvelables (pas de disparité entre technologies). En revanche, elles ne font pas apparaître d'effet significatif sur l'innovation les dépenses publiques de R&D réalisées à l'étranger, alors que cet effet était également attendu.

De façon plus indirecte, les politiques de diffusion (basées sur les prix ou les quantités) ont également un effet sur la dynamique d'innovation. Mais sur ce plan, les instruments prix qui renforcent la stabilité et la prévisibilité du marché pour les nouvelles technologies de l'énergie présentent des résultats plus nettement positifs que les instruments quantités.

Les études économétriques confirment également ce que les études non économétriques avaient mis en avant, c'est-à-dire, un impact positif des politiques de diffusion sur le déploiement des technologies. Politiques de prix et politiques quantités présentent des effets nettement positifs

mais les politiques prix apparaissent plus efficaces pour des raisons qui ont été bien décrites dans les travaux non économétriques.

Les impacts sur le changement technologique peuvent être différenciés selon le niveau de maturité des technologies. Ainsi, l'effet des politiques de prix, qui protègent les nouvelles technologies de la concurrence directe facilitent leur émergence et se révèlent donc plus significatif pour la diffusion des technologies solaires que pour la diffusion des technologies éoliennes. Pour cette même raison, les politiques de diffusion basées sur les quantités qui exposent les nouvelles technologies à la concurrence sont plus adaptées à la diffusion des technologies éolienne que solaire.

Cette synthèse des études économétriques et la statistique descriptive qu'elle a permise font ainsi apparaître des conclusions plus spécifiques à certaines technologies, à certains types de politiques… Il serait certainement intéressant de prolonger ce travail par une méta-analyse s'appuyant sur une recherche bibliographique plus systématique qui permettrait sans doute de mieux identifier les sources d'hétérogénéité dans les résultats. .

Par ailleurs, cette synthèse de la littérature fait ressortir un certains aspects encore peu étudiés. Grafström et Lindman (2017) ou Kim et Kim (2015), par exemple, cherchent à comprendre les mécanismes de rétroaction en jeu dans les processus de changement technologique. Cette prise en compte des feedbacks entre innovation et diffusion constitue une limite importante des études économétriques actuelles et une difficulté persistante de modélisation empirique des processus interactifs.

Un autre aspect important est la prise en compte des effets de *spillovers* : la mise en œuvre d'une politique de diffusion dans un pays se traduisant par une incitation à innover dans d'autres pays par le biais des transferts de technologies et des importations. Ce point n'a pas été étudié dans cette revue de la littérature du fait du trop faible nombre d'études répertoriées sur ce sujet, mais mériterait de l'être. De même, la littérature économétrique sur la diffusion des innovations entre les pays apparaît très peu fournie alors que les enjeux en termes d'emplois et de stratégie industrielle sont importants.

L'influence du design des politiques ou la façon de mesurer les politiques dans les modèles économétriques n'est également pas suffisamment étudiée. Ces points sont bien documentés dans les études sur la diffusion au sein des pays mais pas pour les autres étapes du processus. Enfin, nous constatons un déficit d'utilisation de méthodes économétriques propres aux évaluations des politiques publiques (comme les modèles différence de différences). Il serait ainsi intéressant, de les mettre en œuvre pour de futures recherches sur le sujet car elles permettent une meilleure identification de l'impact propre d'une politique indépendamment des effets de contextes.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Nadine Massard pour ses précieux conseils.

Bibliographie

Adelaja, A., Hailu, Y.G., McKeown, C.H., and Tekle, A.T. (2010). Effects of Renewable Energy Policies on Wind Industry Development in the US. Journal of Natural Resources Policy Research *2*, 245–262.

Boehringer, C., Cuntz, A.N., Harhoff, D., and Asane-Otoo, E. (2014). The Impacts of Feed-In Tariffs on Innovation: Empirical Evidence from Germany (Rochester, NY: Social Science Research Network).

Bolkesjø, T.F., Eltvig, P.T., and Nygaard, E. (2014). An Econometric Analysis of Support Scheme Effects on Renewable Energy Investments in Europe. Energy Procedia *58*, 2–8.

Bowen, E., and Lacombe, D.J. (2015). Spatial interaction of renewable portfolio standards and their effect on renewable generation within NERC regions (Morgantown, W Va. : West Virginia Univ., Dep. of Economics).

Braun, F.G., Schmidt-Ehmcke, J., and Zloczysti, P. (2010). Innovative Activity in Wind and Solar Technology: Empirical Evidence on Knowledge Spillovers Using Patent Data. SSRN Electronic Journal.

Bürer, M.J., and Wüstenhagen, R. (2009). Which renewable energy policy is a venture capitalist's best friend? Empirical evidence from a survey of international cleantech investors. Energy Policy *37*, 4997–5006.

Butler, L., and Neuhoff, K. (2008). Comparison of feed-in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development. Renewable Energy *33*, 1854–1867.

Canton, J., and Lindén, Å. (2010). Support schemes for renewable electricity in the EU (Brussels: European Commission, Directorate-General for Economic and Financial Affairs).

Carley, S. (2009). State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness. Energy Policy *37*, 3071–3081.

Carley, S., Baldwin, E., MacLean, L.M., and Brass, J.N. (2016). Global Expansion of Renewable Energy Generation: An Analysis of Policy Instruments. Environmental and Resource Economics.

Choi, H., and Anadón, L.D. (2014). The role of the complementary sector and its relationship with network formation and government policies in emerging sectors: The case of solar photovoltaics between 2001 and 2009. Technological Forecasting and Social Change *82*, 80–94.

Criqui, P., Martin, J.-M., Schrattenholzer, L., Kram, T., Soete, L., and Zon, A. (2000). Energy technology dynamics. International Journal of Global Energy Issues *14*, 65–103.

Dalmazzone, S., and Corsatea, T.D. (2012). A Regional Analysis of Renewable Energy Patenting in Italy. SSRN Electronic Journal.

Dechezleprêtre, A., and Glachant, M. (2014). Does foreign environmental policy influence domestic innovation? Evidence from the wind industry. Environmental and Resource Economics *58*, 391–413.

Dechezleprêtre, A., Bassi, S., and Martin, R. (2016). Climate Change Policy, Innovation and Growth.

del Río, P., and Bleda, M. (2012). Comparing the innovation effects of support schemes for renewable electricity technologies: A function of innovation approach. Energy Policy *50*, 272–282.

del Río, P., and Gual, M.A. (2007). An integrated assessment of the feed-in tariff system in Spain. Energy Policy *35*, 994–1012.

del Río, P., and Tarancón, M.-Á. (2012). Analysing the determinants of on-shore wind capacity additions in the EU: An econometric study. Applied Energy *95*, 12–21.

Delmas, M.A., and Montes-Sancho, M.J. (2011). U.S. state policies for renewable energy: Context and effectiveness. Energy Policy *39*, 2273–2288.

Dijkgraaf, E., van Dorp, T., and Maasland, E. (2014). On the Effectiveness of Feed-In Tariffs in the Development of Photovoltaic Solar. SSRN Electronic Journal.

Dinica, V. (2006). Support systems for the diffusion of renewable energy technologies—an investor perspective. Energy Policy *34*, 461–480.

Dong, C.G. (2012). Feed-in tariff vs. renewable portfolio standard: An empirical test of their relative effectiveness in promoting wind capacity development. Energy Policy *42*, 476–485.

Dutra, R.M., and Szklo, A.S. (2008). Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. Renewable Energy *33*, 65–76.

EC (2008). European Commission Staff Working Document "The support of electricity from renewable energy sources", accompanying document to the proposal for a directive of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources.

Emodi, N.V., Shagdarsuren, G., and Tiky, A.Y. (2015). Influencing Factors Promoting Technological Innovation in Renewable Energy. International Journal of Energy Economics and Policy *5*, 889–900.

Fischer, C., Newell, R.G., and Preonas, L. (2014). Environmental and Technology Policy Options in the Electricity Sector: Interactions and Outcomes. SSRN Electronic Journal.

Fouquet, D., and Johansson, T.B. (2008). European renewable energy policy at crossroads—Focus on electricity support mechanisms. Energy Policy *36*, 4079–4092.

Gavard, C. (2016). Carbon price and wind power support in Denmark. Energy Policy *92*, 455–467.

Grafström, J., and Lindman, Å. (2017). Invention, innovation and diffusion in the European wind power sector. Technological Forecasting and Social Change *114*, 179–191.

Grübler, A., Nakićenović, N., and Victor, D.G. (1999). Dynamics of energy technologies and global change. Energy Policy *27*, 247–280.

Haas, R., Resch, G., Panzer, C., Busch, S., Ragwitz, M., and Held, A. (2011). Efficiency and effectiveness of promotion systems for electricity generation from renewable energy sources–Lessons from EU countries. Energy *36*, 2186–2193.

Hitaj, C. (2013). Wind power development in the United States. Journal of Environmental Economics and Management *65*, 394–410.

Hitaj, C., Schymura, M., and LLschel, A. (2014). The Impact of a Feed-In Tariff on Wind Power Development in Germany. SSRN Electronic Journal.

Hvelplund, F.K. (2001). Political prices or political quantities?: A comparison or renewable energy support systems.

IPCC (2012). Renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers and technical summary : special report of the intergovernmental panel on climate change. (New York?}: [Cambridge University Press?).

Jaffe, A.B., Trajtenberg, M., and Henderson, R. (1993). Geographic Localization of Knowledge Spillovers as Evidenced by Patent Citations. The Quarterly Journal of Economics *108*, 577–598.

Jamasb, T. (2007). Technical change theory and learning curves: patterns of progress in electricity generation technologies. The Energy Journal 51–71.

Jenner, S., Groba, F., and Indvik, J. (2013). Assessing the strength and effectiveness of renewable electricity feed-in tariffs in European Union countries. Energy Policy *52*, 385–401.

Johnstone, N., Haščič, I., and Popp, D. (2010). Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts. Environmental and Resource Economics *45*, 133–155.

Kahouli-Brahmi, S. (2008). Technological learning in energy–environment–economy modelling: A survey. Energy Policy *36*, 138–162.

Kilinc-Ata, N. (2016). The evaluation of renewable energy policies across EU countries and US states: An econometric approach. Energy for Sustainable Development *31*, 83–90.

Kim, K., and Kim, Y. (2015). Role of policy in innovation and international trade of renewable energy technology: Empirical study of solar PV and wind power technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews *44*, 717–727.

Kim, K., Heo, E., and Kim, Y. (2017). Dynamic Policy Impacts on a Technological-Change System of Renewable Energy: An Empirical Analysis. Environmental and Resource Economics *66*, 205–236.

Klessmann, C., Held, A., Rathmann, M., and Ragwitz, M. (2011). Status and perspectives of renewable energy policy and deployment in the European Union—What is needed to reach the 2020 targets? Energy Policy *39*, 7637–7657.

Kouvaritakis, N., Soria, A., and Isoard, S. (2000). Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching. International Journal of Global Energy Issues *14*, 104–115.

Krasko, V.A., and Doris, E. (2013). State distributed PV policies: Can low cost (to government) policies have a market impact? Energy Policy *59*, 172–181.

Kruse, J., and Wetzel, H. (2014). Energy prices,technological knowledge and green energy innovation: A dynamic panel analysis of patent counts.

Lanzi, E., Haščič, I., and Johnstone, N. (2012). The determinants of innovation in electricity generation technologies: A patent data analysis. In OECD, Energy and Climate Policy: Bending the Technological Trajectory

Lewis, J., and Wiser, R. (2005). Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Li, S.-J., Chang, T.-H., and Chang, S.-L. (2017). The policy effectiveness of economic instruments for the photovoltaic and wind power development in the European Union. Renewable Energy *101*, 660–666.

Liang, J., and Fiorino, D.J. (2013). The Implications of Policy Stability for Renewable Energy Innovation in the United States, 1974-2009: Implications of Policy Stability. Policy Studies Journal *41*, 97–118.

Lindman, Å., and Söderholm, P. (2016). Wind energy and green economy in Europe: Measuring policy-induced innovation using patent data. Applied Energy *179*, 1351–1359.

Lipp, J. (2007). Lessons for effective renewable electricity policy from Denmark, Germany and the United Kingdom. Energy Policy *35*, 5481–5495.

Lüthi, S., and Wüstenhagen, R. (2012). The price of policy risk—Empirical insights from choice experiments with European photovoltaic project developers. Energy Economics *34*, 1001–1011.

Masini, A., and Menichetti, E. (2012). The impact of behavioural factors in the renewable energy investment decision making process: Conceptual framework and empirical findings. Energy Policy *40*, 28–38.

Menanteau, P., Finon, D., and Lamy, M.-L. (2003). Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy. Energy Policy *31*, 799–812.

Menz, F.C., and Vachon, S. (2006). The effectiveness of different policy regimes for promoting wind power: Experiences from the states. Energy Policy *34*, 1786–1796.

Mitchell, C., Bauknecht, D., and Connor, P.M. (2006). Effectiveness through risk reduction: a comparison of the renewable obligation in England and Wales and the feed-in system in Germany. Energy Policy *34*, 297–305.

Neij, L. (2008). Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. Energy Policy *36*, 2200–2211.

Nesta, L., Vona, F., and Nicolli, F. (2014). Environmental policies, competition and innovation in renewable energy. Journal of Environmental Economics and Management *67*, 396–411.

Nicolini, M., and Tavoni, M. (2017). Are renewable energy subsidies effective? Evidence from Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews *74*, 412–423.

Nicolli, F., and Vona, F. (2016). Heterogeneous policies, heterogeneous technologies: The case of renewable energy. Energy Economics *56*, 190–204.

Peters, M., Schneider, M., Griesshaber, T., and Hoffmann, V.H. (2012). The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change – Does the locus of policies matter? Research Policy *41*, 1296–1308.

Polzin, F., Migendt, M., Täube, F.A., and von Flotow, P. (2015). Public policy influence on renewable energy investments—A panel data study across OECD countries. Energy Policy *80*, 98–111.

Popp, D., Hascic, I., and Medhi, N. (2011). Technology and the diffusion of renewable energy. Energy Economics *33*, 648–662.

Ragwitz, M., Held, A., Resch, G., Faber, T., Haas, R., Huber, C., Coenraads, R., Voogt, M., Reece, G., and Morthorst, P.E. (2007). Assessment and optimisation of renewable energy support schemes in the European electricity market.

Resch, G., Faber, M., Grenna Jensen, S., Haas, R., Held, A., Huber, C., Jaworski, L., Konstantinaviciute, I., Morthorst, P., and Panzer, C. (2009). futures-e-Deriving a future European Policy for Renewable Electricity; Final report of the research project futures-e, with support from the European Commission,

Rexhäuser, S., and Löschel, A. (2015). Invention in energy technologies: Comparing energy efficiency and renewable energy inventions at the firm level. Energy Policy *83*, 206–217.

Romano, A.A., Scandurra, G., Carfora, A., and Fodor, M. (2017). Renewable investments: The impact of green policies in developing and developed countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews *68*, 738–747.

Rübbelke, D.T.G., and Weiss, P. (2011). Environmental Regulations, Market Structure and Technological Progress in Renewable Energy Technology - A Panel Data Study on Wind Turbines. SSRN Electronic Journal.

Sagar, A.D., and van der Zwaan, B. (2006). Technological innovation in the energy sector: R&D, deployment, and learning-by-doing. Energy Policy *34*, 2601–2608.

Sarzynski, A., Larrieu, J., and Shrimali, G. (2012). The impact of state financial incentives on market deployment of solar technology. Energy Policy *46*, 550–557.

Sawin, J. (2006). National policy instruments: Policy lessons for the advancement & diffusion of renewable energy technologies around the world. Renewable Energy. A Global Review of Technologies, Policies and Markets.

Sawin, J.L. (2001). The role of government in the development and diffusion of renewable energy technologies: Wind power in the United States, California, Denmark and Germany, 1970--2000.

Schmid, G. (2012). The development of renewable energy power in India: Which policies have been effective? Energy Policy *45*, 317–326.

Shrimali, G., and Jenner, S. (2013). The impact of state policy on deployment and cost of solar photovoltaic technology in the U.S.: A sector-specific empirical analysis. Renewable Energy *60*, 679–690.

Shrimali, G., and Kniefel, J. (2011). Are government policies effective in promoting deployment of renewable electricity resources? Energy Policy *39*, 4726–4741.

Shrimali, G., Chan, G., Jenner, S., Groba, F., and Indvik, J. (2015). Evaluating Renewable Portfolio Standards for In-State Renewable Deployment: Accounting for Policy Heterogeneity. Economics of Energy & Environmental Policy *4*.

Shrimali, G., Jenner, S., Groba, F., Chan, G., and Indvik, J. (2012). Have State Renewable Portfolio Standards Really Worked? Synthesizing Past Policy Assessments to Build an Integrated Econometric Analysis of RPS effectiveness in the U.S. SSRN Electronic Journal.

Smith, M.G., and Urpelainen, J. (2014). The Effect of Feed-in Tariffs on Renewable Electricity Generation: An Instrumental Variables Approach. Environmental and Resource Economics *57*, 367–392.

Söderholm, P., and Klaassen, G. (2007). Wind power in Europe: a simultaneous innovation–diffusion model. Environmental and Resource Economics *36*, 163–190.

Stern, N.H. (2007). The economics of climate change: the Stern review (cambridge University press).

Van der Linden, N.H., Uyterlinde, M., Vrolijk, C., Ericsson, K., Khan, J., Nilsson, L., Astrand, K., and Wiser, R. (2005). Review of international experience with renewable energy obligation support mechanisms (Energy research Centre of the Netherlands ECN).

Verbruggen, A., and Lauber, V. (2012). Assessing the performance of renewable electricity support instruments. Energy Policy *45*, 635–644.

Vincenzi, M., and Ozabaci, D. (2017). The Effect of Public Policies on Inducing Technological Change in Solar Energy. Agricultural and Resource Economics Review *46*, 44–72.

Walz, R., Schleich, J., and Ragwitz, M. (2011). Regulation, Innovation and Wind Power Technologies: An Empirical Analysis for OECD Countries. In DIME Final Conference, p. 8.
Weitzman, M.L. (1974). Prices vs. quantities. The Review of Economic Studies *41*, 477–491.

Wiser, R., Barbose, G., and Holt, E. (2011). Supporting solar power in renewables portfolio standards: Experience from the United States. Energy Policy *39*, 3894–3905.

Yin, H., and Powers, N. (2010). Do state renewable portfolio standards promote in-state renewable generation?. Energy Policy *38*, 1140–1149.

Zachmann, G., Serwaah-Panin, A., and Peruzzi, M. (2015). When and How to Support Renewables?—Letting the Data Speak. In Green Energy and Efficiency

Zhang, F. (2013). How Fit are Feed-in Tariff Policies? Evidence from the European Wind Market (The World Bank).

Zhao, Y., Tang, K.K., and Wang, L. (2013). Do renewable electricity policies promote renewable electricity generation? Evidence from panel data. Energy Policy *62*, 887–897.