HAL open science

L'approche économique des transitions énergétiques et l'innovation environnementale : une application au CCS et au BCCS

Xavier Galiègue

To cite this version:

Xavier Galiègue. L'approche économique des transitions énergétiques et l'innovation environnementale : une application au CCS et au BCCS. 2012. halshs-00826952

HAL Id: halshs-00826952

https://shs.hal.science/halshs-00826952

Preprint submitted on 28 May 2013

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.

Laboratoire d'Economie d'Orléans

Document de Recherche

n° 2012-02

« L'approche économique des transitions énergétiques et l'innovation environnementale : une application au CCS et au BCCS»

Xavier GALIEGUE

Laboratoire d'Economie d'Orléans – UMR CNRS 7322 Faculté de Droit, d'Economie et de Gestion,
Rue de Blois, B.P. 26739 – 45067 Orléans Cedex 2 - France
Tél : 33 (0)2 38 41 70 37 – 33 (0)2 38 49 45 04 – Fax : 33 (0)2 38 41 73 80
E-mail : leo@univ-orleans.fr - http://www.univ-orleans.fr/leo/

L'approche économique des transitions énergétiques et l'innovation environnementale : une application au CCS et au BCCS[1]

Xavier GALIEGUE
Laboratoire d'Economie d'Orléans

Février 2012

Résumé Si les innovations environnementales vont être amenées à jouer un rôle décisif dans les transitions énergétiques, leur mise en oeuvre n'a rien de spontané et nécessite de faire appel à des schémas incitatifs crédibles et des mesures réglementaires fortes. Les techniques en jeu sont en effet lourdes, engageant des externalités de réseau et des économies d'échelle, avec une forte incertitude technique et économique. Dans le domaine des transitions énergétiques le progrès technique peut aboutir ainsi à des « effets de rebond », l'amélioration de l'efficience énergétique d'une technique pouvant prolonger son utilisation et retarder l'adoption de techniques permettant de réduire plus drastiquement l'intensité en carbone de l'économie. Les techniques de capture et de stockage de carbone, à partir d'énergie fossile (CCS) ou de biomasse (BECCS) apparaissent de ce point de vue comme un moyen de rendre compatible l'utilisation des énergies fossiles avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Elles n'échappent aux contraintes décrites précédemment, auxquelles il faut ajouter celles pesant sur le prix du carbone évité, sur leur statut réglementaire, et leur acceptabilité. En tout état de cause l'intégration de ces techniques reste une priorité pour les systèmes nationaux d'innovation.

Summary While the environmental innovations will play a key role in the transition towards new energetical systems, their implementation is rather difficult to be set up and will require some incentive and regulatory schemes. The techniques at stake are rather difficult to implement, implying scale and network économies, with an important technical and economic uncertainty. Technical progress can even lead to a « rebound effect », the increase in the energy efficiency of old techniques allowing to delay the adoption of more decarbonized techniques. From this point of view, Carbon Capture and Storage techniques, from fossil fuels (CCS) or bioenergy (BCCS) appear to a promising way to reach stringent greenhouse gas reduction targets, but may also lead to extend the use of fossil fuels on a longer timescale. These techniques are moreover submitted to the evolution of mitigation costs, to the regulatory uncertainty and to their social acceptability. It is really a new challenge for the national Innovation system to help to develop environmetal techniques, and to find incentives schemes able to promote them.

Mots Clés : Economie de l'environnement, Economie de l'innovation, Economie de l'énergie, Capture et Stockage du CO_2 , Capture et Stockage du CO_2 à partir de la Biomasse.

Key Words : Environmental Economics, Innovation Economics, Energy Economics, Carbon Capture and Storage (CCS), Carbon Capture and Storage from Biomass (BCCS)

---

[1] Cette contribution est issue d'un travail mené dans le cadre du programme Interdisciplinaire Energie du CNRS ALICANTE, Analyse Interdisciplinaire et comparative de l'acceptabilité des nouvelles technologies de l'énergie, Juillet 2011.

Ce document de recherche se propose de présenter le point de vue des économistes sur les transitions énergétiques qui mobilise les instruments généraux de l'économie de l'innovation et ceux, plus spécifiques, des économistes de l'énergie. Il est issu d'un dialogue fructueux mené avec les partenaires du projet ALICANTE (pour Analyse interdisciplinaire et comparative de l'acceptabilité des nouvelles technologies de l'énergie), sociologue et physiciens.

Le passage d'un système énergétique à l'autre met en oeuvre des investissements d'un montant considérable, nécessitant un amortissement sur de longues périodes, et reposant sur des complémentarités qui impliquent une intervention publique forte et un cadre réglementaire stable. Cette inertie considérable a tendance à rendre difficile tout changement par rapport au mix énergétique précédent, même et surtout s'il est inéluctable. De ce point de vue la mise en œuvre des techniques de Capture et de stockage du CO_2 à partir des sources d'énergie fossile (CCS) ou de biomasse (BECCS), est emblématique : considérées comme indispensable à la réalisation des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 (GIEC, 2005),(IEA, 2008), ces techniques sont soumises aux contraintes affectant les transitions énergétiques, auxquelles il faut ajouter celles qui sont liées aux incertitudes concernant le statut du carbone évité, à son prix, et à leur caractère novateur.

La littérature consacrée à ce thème est considérable, elle touche aussi bien des développements théoriques avancés que des modèles plus appliqués, des niveaux d'analyse différents allant de la microéconomie à des modèles agrégés, et tous les paradigmes de l'analyse économique, du mainstream néoclassique à des approches plus critiques comme les approches évolutionnistes ou institutionnalistes. Dans le cadre du projet Alicante, il n'est évidemment pas question d'en couvrir l'ensemble, mais d'en présenter un certain nombre d'apports, en se focalisant sur les problèmes posés par le CCS et le BCCS. Les résultats obtenus sur un projet pilote menée dans le cadre d'une collaboration avec le BRGM viendront en appui de cette présentation générale.

I Economie de l'environnement et innovation : quelques éléments d'analyse.

Longtemps distincts, les développements de l'économie de l'innovation et de l'environnement se rejoignent à l'heure actuelle dans les travaux consacrés à la lutte contre le changement climatique, qui insistent toutefois sur la nécessité de la mise en place de politiques cohérentes et crédibles.

I.1 L'Innovation environnementale : théorie et pratique

L'économie de l'environnement et l'économie de l'innovation partagent une caractéristique

commune, qui est de reposer sur l'existence d'externalités. En économie de l'innovation elles sont positives : une innovation engendre un gain collectif et aléatoire, qui peut profiter partiellement à son créateur, mais qui peut ne pas couvrir l'ensemble des coûts qu'il a supporté. Le rendement social de l'innovation est supérieur à son rendement privé, ce qui nécessite de recourir à un financement public. En économie de l'environnement on retrouve cette asymétrie, qui porte cette fois-ci sur les coûts: comme le coût social d'une nuisance n'est pas supporté par son auteur, son coût privé est inférieur à son coût social. La mesure correctrice consiste à lui faire supporter ce coût par le principe du pollueur payeur.

Les innovations environnementales combinent ces deux types d'externalités: alors qu'elles profitent à l'ensemble de la population, elles ont peu de chances d'être adoptées spontanément en l'absence d'intervention publique. Cette intervention publique joue sur deux tableaux : il faut corriger l'externalité environnementale, et encourager l'innovation pour augmenter les externalités de connaissance (Pop, Newell et Jaffe, 2009). Par exemple l'évolution spontanée des marchés a pu certes aboutir au renchérissement du prix de l'énergie, qui expliquerait pour un quart à la moitié des gains d'efficacité énergétique (Newell,R. Jaffe A., Stavins R (1999) , Gillingham K., Newell R. et Palmer K. (2009), mais l'action des pouvoirs publics a été déterminante, dans le sens où les différences de taxation et de réglementation ont abouti à des grandes disparités dans l'efficience énergétique. De ce point de vue le réchauffement climatique constitue un défi redoutable: il concerne un bien public, le climat, qui est mondial dans le sens où il est affecté par l'ensemble des émissions anthropiques, mais dont les effets de la dégradation sont asymétriques dans l'espace et le temps: ils affectent les pays très différemment, et à un horizon lointain et incertain.

Face à cette double défaillance de marché, il n'est pas surprenant de constater que l'effort d'innovation des économies des pays les plus industrialisés reste très marginalement tourné vers les technologies environnementales (Aghion, Veugelers, Serre, 2009). Ainsi seuls 2,15% des brevets déposés à l'organisation internationale des brevets l'étaient dans le domaine des technologies environnementales, avec une domination du Japon, qui produit à lui seul 35% de ces brevets, contre 15% pour les Etats Unis (figure 1). Si on ramène ces dépôts au total des dépôts de brevet, on obtient un indicateur d'avantage technologique relatif, où la Chine, la France, le Canada et l'Allemagne prennent les premières places, contrairement aux Etats Unis, dont le classement est très faible. Dans le domaine de la RD il n'est pas possible de différencier ces dépenses selon leur destination, par contre les résultats obtenus dans le domaine de la production et de la distribution de l'électricité sont édifiants (tableau 2): bien que responsables d'une part importante des émissions de CO2, leur dépenses de RD sont étonnamment faibles. Leur part dans la RD mondiale est inférieure à 1% et de

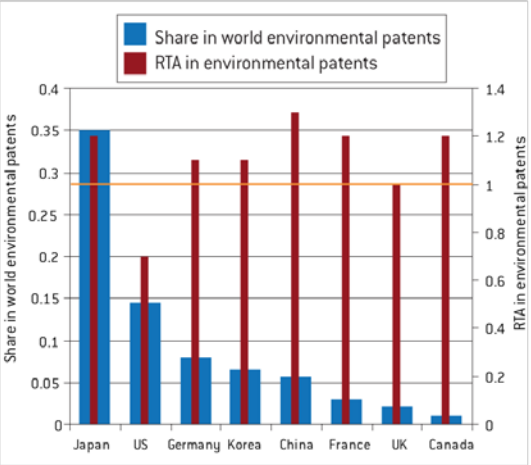
plus elle a baissé, passant de 0,9% en 1990-95 à 0,5% en 2000-04, pour un secteur qui représente 2,2% de la valeur ajoutée sur le même périmètre d'entreprises (tableau 1).

Table 1: Environmental technology patenting

	Share of technology 2003-05	Av. annual growth rate 1995-2005
All tech	100%	12.1%
Renewables	0.42%	15.8%
Auto-pollution control	0.85%	12.9%
Fuel cells	0.6%	24.6%
Nuclear	0.45%	5.8%
ICT	36%	15.5%
Nanotech	1.1%	18%
Biotech	5.8%	5.5%

Source: On basis of OECD, Compendium of Patent Statistics, 2008. Note: Renewables: wind (28.8 percent), solar (29.2 percent), geothermal (28 percent), ocean (7.6 percent), biomass (4.8 percent), waste (26.7 percent).

Figure 1: Countries' share of and specialisation in environmental patents



Source: WIPO 2009, Patent Cooperation Treaty applications relating to environmental technologies (2001-2005 average). Note: RTA is share of the country in world environmental patents relative to the share of the country in total world patents; RTA > 1 measures specialisation in environmental patents.

Table 2: EGD R&D expenditures, selected countries and regions

	Growth in R&D average annual growth rate, 2000-03	Share of country in total world EGD R&D, 2000-04	Share of country in EGD R&D relative to share of country in total R&D (RTA)
US	-2.5%	6.8%	0.15
Japan	-2.7%	27.9%	1.55
EU	-2.8%	46.5%	1.69
Germany	0.6%	3.8%	0.42
France	-0.3%	21.3%	2.07
UK	-27.8%	7.6%	1.05
Spain	31.1%	3.4%	3.20
Sweden	15.2%	1.9%	1.05

Source: OECD, ANBERD (2007). Note: The Spanish increase reverses the downward trend seen from 1995-2000; the Swedish trend was downwards between 1992-2001.

Source : Aghion, Veugelers, Serre (2009), Cold start for the green innovation machine, Bruegel Policy Contribution, n°12, Novembre 2009, disponible sur www.bruegel.org/publications/show.html

Il faut toutefois noter que des efforts récents et considérables ont été réalisés dans la RD tournée

vers les technologies environnementales, principalement sous l'impulsion des dépenses gouvernementales. Sur les figures 2.1 et 2.2, on observe un accroissement considérable des ces budgets, qui sont passé de 3 Milliards de dollars au début des années 2000 à 8 Milliards en 2009 pour l'ensemble des pays membres de l'AIE.

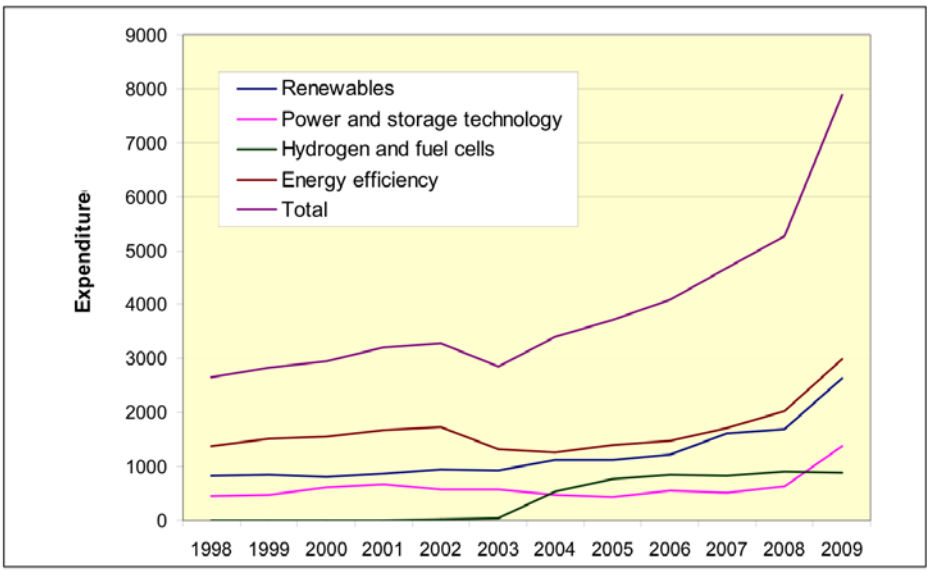


Figure 2.1 **Total IEA Government expenditures on relevant energy technology R&D** (million 2009 USD PPP)

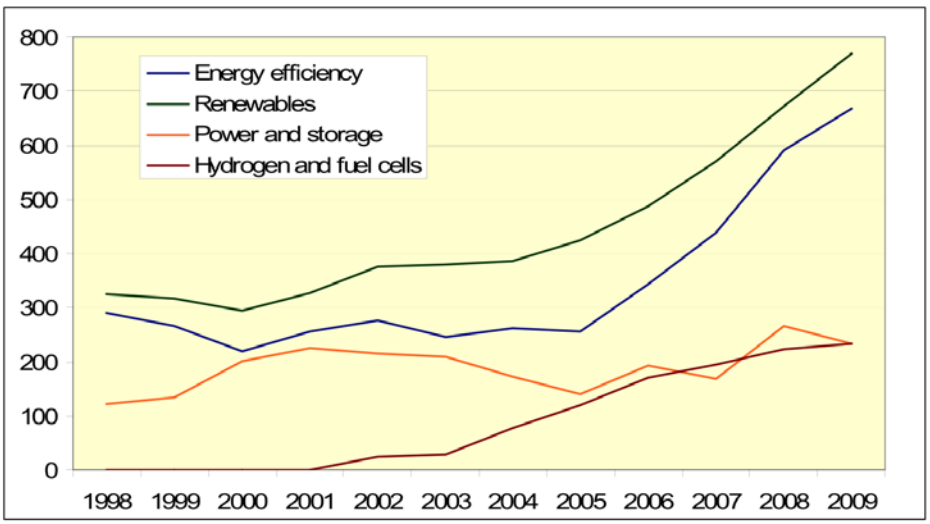


Figure 2.2 **Total European Government expenditures on relevant energy technology R&D (million 2009 USD PPP).**
Source: IEA, 2010

L'une des contraintes pesant sur l'innovation environnementale est relative aux délais de mise en œuvre de ces technologies, qui justifient aussi la prise en charge de leur RD par des fonds publics. Le tableau suivant donne une estimation des années à partir desquelles les technologies utilisant des ressources renouvelables (solaire, éolien, algues) devraient parvenir à être compétitives avec la production d'électricité à partir de charbon : on y voit que, si certaines technologies sont d'ores et déjà compétitives, pour d'autres cette période est plus éloignée, allant jusque 2025-30, voire

inconnue comme dans le cas du CSC.

Table 2.1 Year to reach competitiveness with coal electrical generation

Energy type	Description	Year
Solar	CSP (concentrating solar power)	2015 – 2030, depending on region
Solar	Photovoltaic panels	2015 – 2020 in sunniest regions, 2035 in intermediate zones
Wind	Inshore	2010 (already competitive in best sites)
Wind	Offshore	Up to 2025, depending on location
Biodiesel (algae)	Using CO_2 stream from coal-fired electrical plants	2020 – 2025
CCS	Carbon capture and storage	?

Source: Kovacevic and Wesseler, 2010; Balagopal et al, 2010, Ummel and Wheeler, 2008

Source : Arundel, Kanerva et Kemp, (2011), pp.19-20

I. 2) Quel instrument pour promouvoir l'innovation environnementale ?

Les politiques publiques visant à promouvoir l'innovation environnementale passent par les différents leviers d'action traditionnels dans ce domaine : le recours à la réglementation (dit « command and control »), ou la mise en oeuvre d'instruments économiques, comme les taxes et subvention ou l'instauration de droits d'émission négociables. La situation de transition actuelle est soumise à ce type de contraintes, qui sont aggravées par la difficulté de faire passer par des signaux-prix ou des mécanismes contraignants ou incitatifs l'influence du changement climatique. En effet si la raréfaction à venir des énergies fossiles, principalement du pétrole, est vécue comme une évolution inéluctable, qui passera par l'action de signaux prix tangibles, il en va beaucoup moins pour le basculement vers une plus grande neutralité en carbone de l'économie qui nécessite une inflexion du progrès technique vers l'innovation « verte ».

Dans le rapport qu'il a rédigé pour le Conseil d'Analyse économique, Jean Tirole présente un point de vue qui est partagé par un grand nombre d'économistes: (J. Tirole, 2009): si différents outils sont disponibles pour limiter le réchauffement climatique, ils doivent converger sur la nécessité de parvenir un prix unique par tonne de carbone évitée, ce prix étant calculé pour parvenir aux objectifs de réduction des émissions fixées par le GIEC. Autrement dit, il faudrait parvenir à établir un prix unique du carbone, ce prix étant un indicateur de la contrainte que fait peser la limitation des émissions au niveau planétaire. Un tel système passerait par l'instauration d'un système mondial d'échange de droits à polluer, qui reste évidemment à l'état de vœux. Dans la réalité les résultats sont bien différents.

Les réglementations tout d'abord jouent un rôle considérable dans la protection de l'environnement. Elles ont fait l'objet de nombreux débats, dont le plus célèbre est celui lancé par

Porter et Van der Linde (1995), pour lesquels les réglementations environnementales, loin de constituer un frein à la compétitivité des firmes, doivent être considérées comme une opportunité dans le développement des entreprises et de manière générale de l'économie dans son ensemble. Ce point de vue s'oppose à celui de la majorité des économistes, pour lequel les réglementations sont des instruments imparfaits de protection de l'environnement, essentiellement par ce que leur coût n'est pas souvent pris en compte, ni connu des décideurs (Milliman et Prince, (1989), Palmer, Oates, Portney, (1995)). Fait plus gênant, la réglementation s'appliquant à tous les émetteurs les frappe indistinctement, quel que soit leur cout de dépollution, ce qui peut aboutir à le faire augmenter de manière considérable au niveau collectif. On lui préfère le recours à la taxation, qui laisse le choix à l'agent de dépolluer si le coût de dépollution est inférieur à la taxe, ou de la payer si elle lui est supérieure. Cette plus grande flexibilité de la taxation permet de minimiser le coût de dépollution pour la société. De plus elle fournit un indicateur précieux de ce coût : si les entreprises payent massivement la taxe cela signifie que le cout de dépollution est élevé, si elles ne la payent pas c'est qu'il est bas et que des progrès peuvent être attendus dans ce domaine.

Enfin une autre possibilité est de déterminer directement la quantité de rejets souhaité par la collectivité aux émetteurs et à les autoriser à échanger des droits d'émission, selon qu'ils parviennent à respecter leur quota ou qu'ils le dépassent: dans ce mécanisme de « cap and trade » le cours du droit à polluer devient un indicateur du coût de dépollution, qui dépendra de la rigueur de la contrainte pesant sur les volumes d'émission. Dans le cas de la taxation on fixe le prix que la collectivité attribue à une nuisance et les quantités s'en déduisent, dans celui d'un système de « cap and trade » on fixe la quantité et le prix s'en déduit. Un domaine privilégié d'étude a été celui des centrales thermiques aux Etats Unis, où a été instauré un système d'échanges de droit à polluer dans le domaine des émissions de dyoxide de souffre. Une étude qui a fait date (Joskow et alii, 2000) a ainsi pu établir que le nouveau système de cap and trade avait réduit de moitié le les coûts de réduction des émissions par rapport à la politique de contrôle administratif qui prévalait avant son instauration.

Dans la réalité les politiques environnementales recourent simultanément à ces trois instruments. Dans son rapport, J. Tirole privilégie la généralisation d'un système de cap and trade aux émissions de carbone au niveau mondial, l'idée étant que les problème que pose l'attribution des droits à polluer peuvent être réglés par la négociation, et à la condition que ces allocations s'inscrivent dans un long terme compatible avec l'horizon temporel des industries énergétiques. Mais la présence de sources d'émission diffuse nécessite aussi l'instauration d'une taxe carbone pour les sources d'émission non soumises à quota d'émission (Schubert, 2009, Combet, Ghersi, Hourcade, 2009).

Il faut bien remarquer que dans ce domaine l'écart entre les prescriptions normatives et la réalité est considérable. En effet parvenir à établir un prix unique du carbone tient de la gageure dès lors que ces trois instruments cohabitent, ne serait-ce que du fait des fluctuations du prix du carbone. Enfin il faut aussi noter que la mise en œuvre d'un marché mondial du carbone s'avère pour l'instant ni concevable ni souhaitable: le prix implicite en étant bien inférieur aux USA qu'en Europe, il aboutirait à une baisse considérable de son niveau en Europe et à des ajustements qui seraient sans doute considérés comme trop lourds aux USA.

Un autre aspect à prendre en compte est relatif à l'objectif que se donne la politique environnementale : s'agit-il de promouvoir directement des nouvelles technologies, ou de susciter de nouvelles demandes pour des technologies à faible émission? Dans le premier cas on s'inscrit dans un schéma poussé par la technologie, qui privilégie les politiques de soutien à la R&D par des subventions à l'investissement et à des fonds de capital investissement, dans le second on recourt plutôt à des politiques globales de taxation, ou à la mise en œuvre de systèmes de droit à polluer. Ces deux aspects de l'innovation sont évidemment complémentaires et auto-renforçants: les nouvelles technologies environnementales ne peuvent se développer que si des mesures appropriées permettent de solvabiliser leur demande, tandis que certaines nouvelles demandes ne peuvent être satisfaites que par l'apparition de technologies appropriées. Ces politiques peuvent aussi être globales et génériques, ou se focaliser sur des technologies spécifiques, avec dans le premier cas un risque de saupoudrage des mesures d'appui à l'innovation, et dans le second celui d'un ciblage trop fort, à l'efficacité globale limitée. Le tableau suivant, proposé par Lazarus et Kartha (2009), récapitule les différentes mesures de politique environnementale en fonction de ces deux aspects, et de leur caractère global ou spécifique.

Tableau 3 Les instruments des politiques environnementales en fonction des stratégies d'innovation et de leur cibles.

	Technology push	Market pull
Comprehensive strategies	R&D tax credits, matching funds, or other R&D incentives Competitive R&D funds (contests or bidding processes) Instruments for public-private partnerships in R&D Broad R&D "portfolio strategies" Patent/intellectual property rights (support and transfer) Technology transfer protocols Support for education and training	Economy-wide GHG taxes, permits, trading, or standards Removal of subsidies for GHG-intensive activities Sector-specific GHG permits or regulations (e.g. requiring all new power plants as net zero-emission after 20xx) GHG criteria for international finance (e.g., development bank or export credit agency rules) Voluntary ("avoid regulation") GHG programs
Selective technology- specific strategies (pick winners or "clusters" of winners, or eliminate losers)	Targeted government R&D programs Collaborative research programs and support for private R&D Technology cooperation and transfer programs Technology demonstrations Knowledge diffusion (e.g. extension services, marketing and publicity)	Incentives, requirements, and other support for low GHG technologies (feed-in tariffs, portfolio standards for renewable electricity or fuels, tax credits for nuclear and renewable energy, government procurement of efficient equipment or renewable fuels and electricity, etc.) Regulatory (technology-forcing) standards (e.g. emissions standards, appliance efficiency standards)

Source : Lazarus et Kharta, 2009 , p.13

II Innovation environnementale et transition énergétique.

Les transitions énergétiques n'ont rien d'un long fleuve tranquille : elles ne se réalisent pas spontanément et nécessitent la mise en œuvre de schémas incitatifs crédibles et cohérents. Ces schémas doivent de plus veiller à aboutir à un bon timing dans le déploiement des nouvelles technologies, ce qui n'a pas toujours été bien réalisé dans le passé.

I.I 1 Macroéconomie des transitions énergétiques

Dans le domaine des transitions énergétiques, les réflexions des économistes portent sur les moyens et mécanismes susceptibles d'infléchir les trajectoires technologiques vers une économie neutre en carbone. On a vu en effet que le fonctionnement spontané des économies n'aboutissait pas à un niveau satisfaisant de dépenses en recherche développement en ce domaine. L'idée générale est que les signaux de prix sont un indicateur nécessaire mais non suffisants pour parvenir à réaliser ces transitions. La question posée par ces modèles portent sur l'équilibre à réaliser entre l'application de taxes carbone et/ ou d'un cap and trade donnant un signal prix suffisant pour infléchir le progrès technique vers des technologies propres, et de l'attribution de subventions à l'innovation dans ce domaine.

Les modèles les plus généraux s'inscrivent dans un cadre de croissance endogène, intégrant des externalités (positives) de connaissance et (négatives) d'environnement. Ces dernières se traduisent par l'existence d'un secteur « sale », utilisant des énergies fossiles, et un secteur « propre» ou

« vert », utilisant des énergies renouvelables. (Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L., Hemous D., (2009), pour une présentation pédagogique Aghion, Veugelers, Serre, 2009). Le modèle détermine qu'à la condition d'agir rapidement, une taxation carbone modérée et une subvention forte à la RD environnementale permet de réaliser une transition énergétique à un coût faible, qui permet de maintenir la croissance à un niveau élevé. La limite de ce type de modèle est relatif au caractère ad-hoc de leur structure et de leur résultats, ils dépendent souvent de la valeur de paramètres qui sont considérés comme compatibles avec celles qui sont utilisées sur des modèles plus appliqués. Des progrès sont attendus de la confrontation de ces modèles théoriques avec les données empiriques (Pizer, Popp (2008))

D'autres types de travaux, plus appliquées, arrivent à des conclusions proches des modèles agrégés. Un des points de discussion porte sur le partage à réaliser dans la transition énergétique, entre le prolongement de l'utilisation des énergies fossiles et le passage à des énergies renouvelables. Une forte taxation du carbone peut en effet améliorer l'efficience des sources d'énergie fossile et ainsi prolonger leur utilisation, aboutissant ainsi à un effet de « rebond ». Cette situation ne serait pas dommageable si elle n'aboutissait pas à détourner des investissements dans les énergies renouvelables. Dans une certaine mesure des politiques à terme proche (« near term policies ») peuvent être contradictoires avec les objectifs climatiques de long terme (Azar et Sanden, 2005), ou selon les termes des auteurs, « *There is a risk that the society in its quest for cost-minuimizing in meeting near-term émissions targets, becomes blindfolded when it comes to the more difficult, but equally important issue of bringing more advanced technologies to the shelf* » (Azar et Sanden, 2005). Autrement dit un signal-prix fort a l'avantage d'encourager une substitution vers des technologies existantes (« on the shelf ») qui permettront d'atteindre des objectifs de réduction des émissions à court terme, mais qui s'avèreront par la suite incapables de réduire plus fortement l'intensité en carbone de l'économie. Si l'utilisation des instruments économiques permet d'assurer la première étape de la transition énergétique, il ne permettent pas à eux seuls de sortir de la situation de verrouillage (lock in) dans laquelle se trouvent les économies contemporaine vis à vis des énergies fossiles. Ici aussi le partage entre une taxation du carbone et le recours à des subventions à l'innovation environnementale s'avère favorable à la deuxième, même si ces deux mesures ne sont pas exclusives l'une de l'autre.

Une typologie de l'innovation environnementale qui a été développée par Abernathy et Clarke (1985) et Dijk (2010), et reprise par Arrundel et alli dans le rapport Inno Grips 2011 (Arrundel et alii, 2011) donne un éclairage particulier aux problèmes posés par les transitions énergétiques. Selon cette typologie, l'innovation environnementale prend en compte deux

dimensions :

-tout d'abord, une dimension correspondant aux changements des usages et pratiques marchandes et institutionnelles, qui peuvent être préservés, ou au contraire bouleversés par le changement technique et les changements de préférence. Cette dimension recoupe l'aspect « tiré par la demande » des innovations environnementales.

-ensuite, une dimension liée au degré du changement technique: selon qu'il est mineur ou majeur, une innovation entrainera des changements mineurs, ou majeurs dans les connaissances technologiques et les compétences. On retrouve ici l'aspect poussé par la technologie de ces innovations.

L'interaction entre ces deux dimensions aboutit à définir quatre types d'innovations environnementales, en innovations incrémentales, sociales, techno-fixes et transformatrices. Plus précisément :

-**les innovations incrémentales** apparaissent lorsqu'elles apportent une amélioration à une technologie existante, sans changer les usages et pratiques institutionnelles. C'est le cas par exemple des véhicules hybrides, des maisons passives ou des centrales à énergie solaire.

-**les innovations sociales** portent sur un changement de pratiques associées à une amélioration technique mineure. C'est le cas du co-voiturage, du déplacement en vélo électrique ou en libre disposition (type Velib').

- **les innovations techno-fixes** concernent des changements techniques radicaux qui préservent les pratiques existantes, comme la propulsion des véhicules par hydrogène ou par biocarburants, ou le CCS.

- enfin **les innovations transformatrices** correspondent à la mise en œuvre de nouveaux systèmes technologiques, qui se manifestent par un changement radical de techniques et de pratiques, comme le passage à un système complet de transport électrique, ou au développement des réseaux électriques intelligents (smart grid). Ces innovations nécessitent une reconfiguration complète des réseaux et une remise en question des pratiques et modes de vie.

Tableau 4 Une typologie des Innovations Environnementales

User, market & institutional practices		
Disrupt existing practices	**Social innovation** - Organised car-sharing - Integrated transit - Planning changes	**Transformative innovation** - Electrical transport system - Renewable-electric power supply
Sustain existing practices	**Incremental innovation** - improved windmills - Hybrid vehicles - Low energy appliances - Passive housing - Concentrating solar power	**Techno-fixes** - Carbon capture & storage - Hydrogen cars - Biofuels - Geothermal power
	Minor	Major

Change in technological knowledge & competences

Source : Arundel A., Kanerva M., Kemp R., 2011, p.89

Il est clair que la transition énergétique contemporaine peut prendre ces quatre formes, selon une gradation dépendant des intérêts des différents protagonistes des systèmes énergétiques. Ainsi certains attendent du progrès technique qu'il permette de préserver les modes de vie actuels, au risque d'aboutir à un « effet rebond » dans l'utilisation des énergies fossiles. D'autres estiment au contraire qu'un changement radical des pratiques et modes de vie pourrait suffire à réaliser ces transitions énergétiques, ce qui semble tout à fait irréaliste en l'absence d'innovations techniques, même mineures.

II.2 Les transitions énergétiques : leçon des expériences récentes.

On a vu que l'instauration d'un système d'échanges de quotas d'émission aux Etats-Unis est considéré comme un succès, puisqu'il a permis une réduction des émissions à un coût moindre pour la collectivité que le précédent système de command and control.

Pourtant le constat est beaucoup plus mitigé lorsqu'on considère l'évolution technique du parc de centrales. On aurait pu penser que le renforcement des normes environnementales et l'instauration de quotas d'émission entrainerait un renouvellement du parc des équipements existants. Or il n'en a rien été : on a au contraire observé un vieillissement et un plafonnement de l'efficience des centrales électriques qui a été observé aux Etats Unis sur les trente dernières années (W. Blyth, 2010), attribué sans ambiguité à l'application des normes environnementales (Ellerman,

1996). Ce point, établi en économie de l'énergie (Mulder, de Groot et Hofkes, 2003), sous la forme d'un « paradoxe de l'énergie » (Jaffe et Stavins, 1994) explique la lenteur de la diffusion des nouvelles technologies énergétiques par un ensemble de facteurs convergents: la lourdeur des investissements et les perspectives d'améliorations futures des technologies poussent les entreprises à reporter leurs investissements et à préférer moderniser des équipements anciens plutôt que les renouveler. Les réglementations environnementales jouent un rôle ambivalent dans ce phénomène: elles peuvent pousser les entreprises à renouveler leurs équipements mais à un tel coût que très souvent elles préfèrent adopter des stratégies de « retrofiting » ou de « refurbishing » sur les générations existantes de machines. Elles placent aussi les entreprises face à une incertitude qui peut les pousser à l'attentisme, dans la crainte d'un durcissement futur des normes. En fait il existe une substitution entre l'amélioration du fonctionnement des équipements installés et leur remplacement, et une complémentarité entre les différentes générations de ces machines : les améliorations par l'usage (learnig by using ») apportées aux générations d'équipement les plus récentes profitent à l'ensemble du parc, qui peut ainsi vieillir tout en étant conforme avec les nouvelles normes, ce qui évite de les renouveler. Et l'investissement consacré à ce « retrofiting » n'est plus disponible pour le renouvellement du parc.

Un autre élément doit être pris en compte, qui est relatif à la libéralisation du secteur de l'énergie. Cette dernière a entrainé un accroissement de la concurrence, qui a fait baisser les marges des opérateurs. Cette réduction des marges explique aussi en partie la baisse des l'investissement et des dépenses de RD dans ce secteur.

Ce résultat est conforté par un résultat obtenu par un modèle reliant le progrès technique et le coût d'atténuation du climat. Baker, Clarke et Shittu (2008). Selon ces auteurs, le progrès technique environnemental peut engendrer un effet pervers, à savoir une augmentation du coût d'atténuation du climat lorsqu'on élève son niveau qui peut avoir pour conséquence une hausse des émissions. Ces auteurs comparent une situation où une entreprise dispose de trois technologies énergétiques, l'une à forte émission (le charbon, « sale »), la deuxième à émission modérée (le gaz) et la troisième à zéro émission (le nucléaire, « propre »), à coût croissant. Si l'entreprise a le choix entre les deux technologies extrêmes, (on considère que le gaz ne se trouve pas sur la frontière d'efficience), l'entreprise va substituer le nucléaire au charbon en fonction du coût du carbone évité, qui correspond à la différence de coût entre les deux techniques. Dans ce cas ce changement se fera de manière linéaire: le coût marginal d'atténuation est constant et l'entreprise n'a pas intérêt à adopter la technologie intermédiaire. Maintenant supposons que deux innovations apparaissent sur la technologie intermédiaire, une innovation « modérée » (baisse du coût de production du gaz) ou radicale (capture et stockage sur 90% du CO_2). Dans ce cas l'entreprise va

substituer cette technologie intermédiaire à celle du charbon, dans un premier temps avec l'innovation modérée, dans le deuxième avec l'innovation radicale. Tout le long de cette évolution les émissions de CO2 seront plus importantes que dans la situation sans progrès technique, avec dans une premier temps un coût marginal d'atténuation inférieur, et dans un deuxième supérieur. Les auteurs en déduisent que les objectifs en matière du prix du CO2 sont radicalement différentes selon qu'on se fixe des niveaux modérés ou élevés d'atténuation climatique : atteindre un niveau élevé ne pourra l'être que moyennant un relèvement considérable du prix du carbone, si des techniques à émissions partielles et à coût faibles parviennent à se développer.

III Une application au CCS et BCCS

Les technologies de Capture et de stockage du Co_2, à partir d'énergies fossiles (CCS) ou de biomasse (BCCS), sont considérées comme un des instruments pouvant faciliter la réalisation de l'objectif de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 (GIEC, 2005), IEA (2008). Mais le déploiement de ces techniques est soumis à des incertitudes techniques, économiques et réglementaires lourdes.

III.1 Quels conditions de viabilité du CCS ?

Le CCS qui a abouti d'ores et déjà à l'exploitation de pilotes un peu partout dans le monde, devrait aboutir selon ses protagonistes à des applications commerciales entre les années 2020 et 2030 (Rapport RECIPE, 2009). Si on suit la typologie présentée précédemment, le CCS appartient clairement aux technologies « éco-fixes » qui visent à préserver l'utilisation des énergies fossiles en les rendant compatibles avec un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais plus que d'autres elles sont soumises à des incertitudes multiples, sur le prix des énergies fossiles d'abord, sur le prix du carbone ensuite, qui dépend lui-même du cadre réglementaire et du statut des émissions de CO2 dans le cadre des négociations internationales (Abadie et Chamorro (2008), et de l'acceptabilité de ces techniques. Sur ce dernier point le survey de Campos et alii sur les études d'acceptabilité (Campos, Minh Ha-Duong, Merad, 2010) démontre que ces technologies sont en général acceptées. à la condition de réaliser une information complète des usagers, ce qui ne sera sans doute pas garanti pour les installations futures.

Major active and planned large-scale CCS projects commencing before 2015 in Norway, the Netherlands, United States, Canada and Australia (sources: ETP ZEP, 2008; NETL, 2008; CO2CRC, 2009; NrCan, 2009; IEA GHG, 2009; MIT, 2009).

Country	Name (location)	Project leader	Reservoir type	CO_2 source	Size (Mt/year)	Start
Norway	Sleipner	StatoilHydro	Saline	Gas processing	1	1996
Norway	Snøhvit	StatoilHydro	Gas	LNG production	0.7	2008
Norway	Husnes	Sargas	EOR	Coal – post combustion	2.6	2011
Norway	Karstø	Naturkraft	Saline	Gas – post combustion	1.2	2012
Norway	Mongstad	StatoilHydro	Saline	Gas – post combustion	1.5	2014
Netherlands	CGEN	CGEN NV	Oil & gas	Coal – pre combustion	2	2014
Netherlands	Magnum	NUON	Oil & gas	Various – pre combustion	±1	2015
Netherlands	Enecogen	Eneco	Oil & gas	Gas – post combustion	2	2015
Netherlands	Maasvlakte	EON	Oil & gas	Coal – post combustion	±5	2015
Canada	Weyburn	Pan Canadian	EOR	Coal gasification	1	2000
Canada	Fort Nelson	PCOR	Saline	Gas processing	1.6	2011
Canada	BoundaryDam	SaskPower	EOR	Coal – oxy combustion	±1	2015
Canada	Genesee	Epcor	Saline	Coal – pre combustion	±1	2015
Canada	Alberta Carbon Trunk Line	Enhance Energy	EOR	Oil sand upgrading	1.8	2015
Canada	Quest	Shell	EOR	Oil sand upgrading	±1.5	2015
US	Mt Simon	MGSC/MRCSP	Saline	Ethanol production	1	2009
US	Gulf Coast	SEACARB	Saline	Gas processing	1	2009
US	Entrada	SWP	Saline	Gas processing	1.1	2010
US	Oologah	AEL/Alstom	EOR	Coal – post combustion	1.5	2011
US	Antelope	Basin Electric	EOR	Coal – post combustion	1	2012
US	WA Parish	NRG Energy	EOR	Coal – post combustion	1	2012
US	Williston	PCOR	EOR	Lignite – post combustion	1	2012
US	Kimberlina	CES	Saline	Coal – oxy combustion	1	2012
US	Kern County	Hydrogen Energy	EOR	Petcoke – post combustion	2	2014
US	West Wyoming	BigSky	Saline	Gas processing	1.5	2011
Australia	Coolimba	Aviva Corp.	Oil & gas	Coal – post combustion	3	2015
Australia	Moomba	Santos	EOR	Gas processing	1	2010
Australia	Zerogen	Stanwell	Saline	Coal – pre combustion	0.5	2012
Australia	Gorgon	Chevron Texaco	Saline	Gas processing	3.3	2013
Australia	Monash CTL Project	Monash Energy	Oil & Gas	Coal to liquids – separation	13	2015

Tableau 3 Sites actifs de Capture Stockage du CO_2 en Norvège, aux Pays Bas, USA, Canada, et Australie.

Source : Van Alphen, Hekkert, Turkenburg, 2010.

Les contraintes technico-économiques pesant sur le CCS sont lourdes. Tout d'abord plusieurs techniques concurrentes existent, ce qui est parfois conçu comme un avantage mais qui va se traduire par une duplication des efforts de recherche et d'innovation selon les techniques (Rai et alii, 2009). D'un autre côté il est nécessaire dans ce domaine de préserver une certaine variété des techniques et éviter des « lock in » qui ont été observés dans d'autres technologies (Azar et Sande, 2008). De même ces techniques vont être soumises au paradoxe de l'énergie décrit précédemment, à savoir qu'il sera sans doute parfois préférable de privilégier un retrofit sur des technologies passées plutôt que d'installer des équipement nouveaux coûteux. Dans ce type de situation les opérateurs sont confrontés à un dilemme : ils peut être rationnel de reporter des choix irréversibles afin de bénéficier d'une plus grande visibilité et de nouvelles avancées techniques, au risque d'être devancés par des concurrents plus audacieux qui seront ensuite en mesure d'imposer leur standard technologique (Shapiro et Varian, 2000). Mais s'engager trop rapidement dans une voie expose à supporter des coûts de recherche développement élevés, à être copié par des concurrents suiveurs et même à s'engager dans des impasses technologiques.

Ensuite les études prospectives menées tiennent compte de courbe d'apprentissage qui devraient les faire baisser sensiblement dans le temps. Une étude comparative menée sur trois technologies

équivalentes, à savoir l'énergie nucléaire, le gaz naturel liquéfié (GNL) et les techniques de désulfurisation aux Etats Unis (Rai et alii, 2009) enseigne que cette baisse des coûts n'est pas établie pour deux de ces techniques (les deux premières) et qu'elle doit beaucoup à l'évolution de la concurrence qu'à des phénomènes d'apprentissage, s'agissant de technologies lourdes et encore mal maîtrisées. De plus l'exploitation commerciale de ces sites nécessite un dimensionnement sur des unités de fortes capacités, qui risquent de demander des investissements de réseau pour éventuellement mutualiser les sources d'émission. Plus généralement, le CCS en tant que nouveau STGE sera confronté au problème du partage du financement de ces infrastructures, notamment aux stades du transport et du stockage (Curien, 2005).

Enfin ces techniques, si elles bénéficient de supports publics et privés qui ont permis d'augmenter de manière significative le nombre de pilotes dans le monde, vont être confrontés lors de leur passage à un stade commercial à la « vallée de la mort » de l'innovation. Dans les industries équivalentes étudiées précédemment, ce passage s'est fait en mettant en ouvre la panoplie des instruments de soutien disponibles, à savoir : la mise en oeuvre de subventions à l'investissement et aux prix et le recours à des réglementations protégeant les opérateurs et garantissant leur viabilité financière à long terme (Raii et alii, op.cit.). Le timing de la mise en oeuvre de ces mesures sera décisif : avant d'imposer des réglementations contraignantes, portant par exemple sur l'obligation d'installer le CCS sur les nouvelles unités, les investissements dans les unités de démonstration devront être subventionnés, puis leur production elle même lors de la phase post démonstration et pré-commerciale, tout cela sur un horizon long (Finon, 2009).

Stade de développement de la technique	Démonstration sur une échelle commerciale 2015-20	Post démonstration 2020-30	Précommercial 2030-45
Obligation réglementaire			Oui
Subvention à l'investissement	Oui	Oui	
Subvention à la production		Oui	Oui

Source : D. Finon (2009), Efficiency of Policy choice for the deployment of large scale low carbone technologies, the case of CCS, GIS- Larsen, Novembre 2009.

Une étude récente (Van Alphen, Hekkert, Turkenburg, (2010)) a été menée pour évaluer les techniques de CCS en tant que système d'innovation technique. Il s'agissait, à partir d'entretiens menés auprès de 100 personnes, acteurs de cette technologie, d'évaluer la qualité de ce système d'innovation technique sur sept dimensions : l'existence d'activités entrepreneuriales, de développement et de diffusion des connaissances, d'un pilotage de la filière, la formation d'un marché, la mobilisation des ressources, et la légitimation. Si les indicateurs liés à la diffusion des connaissances et au pilotage sont satisfaisants, les scores obtenus en termes d'activités entrepreneuriales, de formation du marché et de mobilisation de ressources sont beaucoup plus faibles, alors que la légitimation de la filière aboutit à un score moyen, reflétant de fortes disparités entre pays.

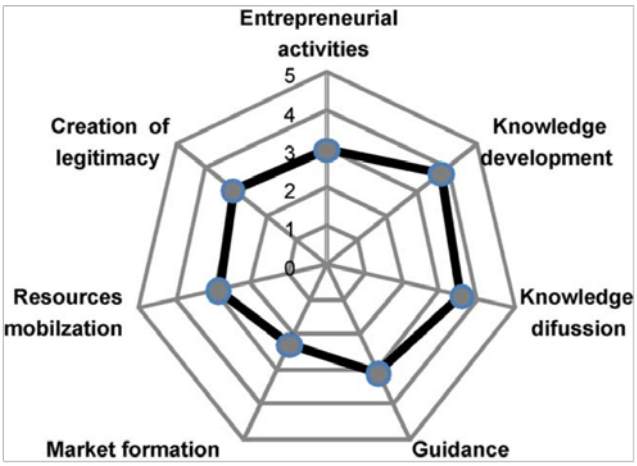


Fig. 1. Spider diagram depicting the overall score on the functions of innovation systems by a hundred experts in Norway, Netherlands, United States, Canada and Australia.

Figure 4 Les scores du CCS en tant que système technique d'innovation

Source : Van Alphen, Hekkert, Turkenburg, 2010.

Enfin le choix de l'instrument réglementaire utilisé pour déployer le CCS est aussi important, deux solutions opposées étant possibles : on peut imposer l'obligation de rendre obligatoire le CCS sur les nouvelles unités (qui seront ainsi « CCS ready »), avec possibilité de « retrofit » sur les anciennes unités, ou proposer une norme de décroissance du CO2 par MégaWatts d'énergie, à charge pour l'opérateur de réaliser cette réduction comme il l'entend, sachant bien sûr qu'à un moment ou à un autre le passage au CCS sera nécessaire. La première solution a l'avantage d'une

grande lisibilité pour les opérateurs et permettrait le déploiement des infrastructures et leur mise en réseau. Par contre elle n'échappe pas aux critiques adressées aux réglementations « command and control », et devra être programmée de manière crédible et à long terme. La deuxième, plus souple à mettre en oeuvre, pourrait être moins couteuse mais placerait les opérateurs dans une plus grande incertitude quant à la mise en place d'infrastructures lourdes.

III.2 Le BCCS, un outil complémentaire ou ultime pour la décarbonation de l'économie ?

Le BCCS, ou Capture et stockage du carbone à partir de la biomasse, ou BECCS lorsqu'il porte sur les bioénergies, porte sur l'adjonction du CCS sur la production de biocarburants ou sur des unités de génération d'énergie à partir de biomasse. Dans l'hypothèse où ces biocarburants sont produits avec un cycle de vie neutre en carbone, le CCS aboutit à une émission négative de Co_2, un véritable puits de carbone artificiel. Le BCCS est envisagé notamment dans des scénarios d'une réduction des émissions à un objectif de 450 ppm à l'horizon 2050. Une autre justification au développement de cette technique à émission négative réside dans le fait qu'elle permettrait de compenser les émissions diffuses de CO_2, issues notamment de l'habitat ou des transports, pour lesquelles le CCS n'est pas applicable. Le BCCS a fait l'objet de premiers travaux dans les pays scandinaves, qui intègrent déjà à leur mix énergétique une part important de biomasse, et qui envisagent de l'appliquer pour atteindre leurs objectifs de réduction des émissions à l'horizon 2050 (Möllersten et alii, 2003, 2006).

Une équipe du LEO travaille depuis 2007 sur une application du BCCS à la production de biomasse, à partir d'un projet pilote, situé à Artenay, financé par la Région Centre (CPER) et dirigé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Il a aussi fait appel dans sa partie technique aux services du Cabinet Geogreen, spécialisé dans le CCS.

Le projet se propose plus précisément d'évaluer la viabilité d'un projet de capture de CO_2 à partir d'une sucrerie-distillerie utilisant la betterave (Bonijoly et alii, 2009). Le stockage serait réalisé dans des acquifères salins profonds, propices à ce type d'utilisation. D'un point de vue économique le projet est soumis aux mêmes contraintes que le CCS, auxquelles il faut ajouter celles qui sont relatives à l'évolution du prix du sucre et de l'éthanol, ainsi qu'au statut du carbone évité.

Dans le projet Artenay, la capture du CO2 est réalisée à deux stades : celui de la fermentation, et celui du séchage et de la distillation de l'éthanol. Sur ce dernier stade la capture du CO_2 est réalisée sur une chaudière fonctionnant actuellement au gaz. Lorsqu'elle est réalisée sur ces deux stades les émissions sont négatives, puisque le cycle de vie du processus est réputé neutre. Par contre dans cette hypothèse la viabilité financière du projet n'est pas assurée, la valeur actuelle nette

du projet étant négative sous des hypothèses d'actualisation correspondant à un projet commercial (8%) (Laude et alii, 2010). L'une des raisons de cette non viabilité est liée au faible dimensionnement du projet, qui est aggravée par la saisonnalité de son fonctionnement. Il est en effet concentré sur les trois mois de la campagne betteravière. Des variantes ont été testées pour tenir compte de possibilité de mutualisation avec un autre site, qui améliore quelque peu son bilan économique mais ne permet pas de le viabiliser pour autant : selon les hypothèses le coût du carbone évité varie de 109,5 à 129,6 € .

Une autre raison de la faible rentabilité du projet provient du coût de la capture du CO_2 auprès de la chaudière de la distillerie, fonctionnant au gaz. En effet cette capture est réalisée à partir d'un procédé par postcombustion, très couteux, alors que la capture résultant de la fermentation se fait à un coût beaucoup plus faible (de 57,4 à 88,4€ la tonne de carbone évité). Dans ce cas le projet est viable, mais il ne crée plus de puits de carbone. Une voie d'amélioration du projet pourrait étudier la capture du CO_2 dans cette phase à partir d'une chaudière fonctionnant au Bioethanol, il est envisagé dans la suite du projet.

Enfin il faut noter que le projet utilise un taux d'actualisation de 8%, qui correspond aux normes du calcul économique privé mais qui est plus élevé que les valeurs utilisées généralement en économie de l'environnement. A ce niveau le BCCS est exposé aux mêmes contraintes que le CCS, sa viabilité reste subordonnée à un support public.

De manière plus générale l'implantation du BCCS pose le problème des petites sources d'émission : le CCS nécessite un dimensionnement important des unités de stockage, alors que les sources d'émission liées à la production de biocarburant et à fortiori de biomasse sont petites, disséminées et pas toujours proches des réservoirs potentiels. De ce point de vue le projet d'Artenay avait été retenu car il se situe dans une région de grande agriculture disposant aussi d'un potentiel important de stockage souterrain, mais on a vu que même dans ce cas un problème de dimensionnement se pose. Il faudrait donc s'interroger sur les différentes modalités du transport du CO_2 par des réseaux de pipelines ou par d'autres moyens, ou par des modalités de stockage différentes du stockage souterrain. Ce qui revient à reposer la question de l'émergence du CCS et du BCCS comme STGE.

IV CONCLUSION

L'innovation environnementale, appelée des vœux de tous, s'avère d'un point de vue normatif comme empirique, difficile à mettre en œuvre et à promouvoir lorsqu'on l'applique aux transitions énergétiques. La raison principale à cet état de fait réside dans la difficulté à infléchir les

mécanismes du marché vers une économie « décarbonée », et à émettre des signaux-prix allant dans ce sens. Pour aboutir à ce résultat, il faut parvenir à définir des politiques nationales et internationales cohérentes, aboutissant à des engagements fermes et crédibles et se traduisant par des schémas réglementaires stables. Il faut aussi veiller au calendrier de déploiement de ces techniques, afin d'éviter des situations de blocage ou d'impasse (« lock in ») technologiques dues à des schémas incitatifs temporellement incohérents, reposant sur des horizons trop courts. C'est à ces conditions que pourront se déployer des véritables systèmes techniques d'innovation tournés vers une économie plus neutre en carbone.

Sources

Abadie L. et Chamorro J. (2008), European CO_2 prices and carbon capture investments, *Energy Economics*, (30) 2008, p. 2992-3015.

Abernathy WJ et Clark K.B. (1985), Innovation. Mapping the wind of creative destruction, *Research Policy*, 14(1), 3-22

Acemoglu , Aghion, Burstyn, Hemous, (2009), «The environment and directed technological change », NBER Working paper n°1451, Octobre 2009.

Arrundel A., Kanerva M., Kemp R. (2011), *Integrated Innovation Policy for an integrated Problem : Addressing Cilmate Change, Resource Scarcity and Demographic Change to 2030*, Pro Inno Group Report, Brussel European CommIssion, DG Entreprise and Industry. Mars 2011.

Aghion, Veugelers, Serre, (2009), « Cold start for the green innovation machine », Bruegel Policy Contribution, n°12, Novembre 2009.

Aghion, Hemous, Veugelers (2009), « No green growth without innovation », Bruegel Policy brief, n°7, Novembre 2009.

Aldy J, Krupnick A., Newell R., Parry I et Pizer W. (2010), Designing Climate Mitigation Policy, *Journal of Economic Literature* 2010,48:4, pp. 903-934.

Azar et Sanden B. et C., 2005, Near term technologies for long-term climate targets-economy wide versus technology specific approaches, *Energy Policy*,33 (2005), 1557-1576

Baker E., Clarke L. et Shittu E.(2008), Technical change and the marginal cost of abattement, Energy Economics, 30 (2008), p. 2799-2816

Blyth W. (2010), « The economics of transition in Power sector », Information paper, International Energy Agency, Janvier 2010.

Bonijoly D., Fabbri A., Chapuis F., Laude A., Ricci A. Bauer H. Grataloup S. Galiègue X., (2009), Technical and Economic feasibility of teh capture and geological Storage of CO_2 from a biofuel

distillery : CPER Artenay project, Energy Proceedia 1, 3927-3934.

A. Fabbri, D. Bonijoly, O. Bouc, G. Bureau, C. Castagnac, F. Chapuis, X. Galiègue, A. Laude, Y. Le Gallo, S. Grataloup, O. Ricci, J. Royer-Adnot, C. Zammit (2011) "From Geology to Economics: Technical and economical feasibility of a biofuel-CCS system", Energy Proceedia 4 2011, with ,*Energy Proceedia 4*, 2011, pp. 2909-17

Campos A.S., Minh-Ha Duong, Merad M., Synthèse de littérature sur l'acceptabilité sociale du captage et du stockage du CO_2 , Minh Ha Duong et Chaabane (ed) , *Capture et Stockage du CO_2 , Enjeux techniques et sociaux en France*, Editions Quae, 2010.

Combet, Ghersi E., Hourcade JC, (2009), Taxe Carbone, une mesure socialement régressive, Document de travail N°12-2009, CIRED, Janvier 2009.

Combet, Ghersi E., Hourcade JC, Thubin C., (2009b) : Economie d'une fiscalité carbone en France, Étude du Cired réalisée avec le soutien de l'ADEME et de la CFDT-IRES - publication IRES - novembre 2009.

Curien N. (2005), *Economie des réseaux*, Repères la Découverte.

Dijk M. (2010), *Innovation in Car mobility,- coevolution of demande and supply under sustainability pressures*, Maatrsicht University Press, Maastricht.

Ellerman (1996), « The competition between coal and natural gas », Resource Policy, 22, pp. 33-42.

D. Finon, Efficiency of policy choices for the deployment of large scale low carbon technologies; the case of CCS, Gis LARSEN Working paper, Novembre 2009.

GIEC (2005), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage Intergovernemental Panel on Climate Change, New York, disponible sur http//www.ipcc.ch/pdf/spécial-report/srccs.wholereport.pdf.

Greaker M., Sagen E. (2008), Explaining experience curves for new energy technologies : a case study of liquefied natural gas, *Energy Economics*, (30) 2008, p. 2899-2911.

Jaffe A.B et Stavins R.N (1994), « The energy paradox and the diffusion of conservation technology», ressource ans Energy Economics, 16, pp. 91-122.

Laude A. et Jonen C (2011), Biomass and CCS : the influence of Learning effect, Docuemtnde Recherche du LEO, n°2011-14.

Joskow, P., Schmalensee, R., Ellerman, A.D., Montero, J.P. et E. Bailey (2000), *Markets for Clean Air : the US Acid Rain program*, Cambridge University Press.

Laude A. Ricci O., Bureau G., Royer-Adnot J., Fabbri A., (2011), CO2 Capture and Storage from a Bioethanol Plant : Carbon, Footprint and Economic Assesment, *International Journal of Greenhouse Gas Control, à paraître, 2011*.

Laude et Jonen (2010), Biomass and CCS : the influence of Learning effect, soumis à *Energy*

Policy.

Lazarus M et Kartha S. (2009), *Linking technology development with emissions commitments Exploring metrics for effort and outcome*, Stockholm Environment Institute Worlking paper, WP-US-0909.

Milliman S. et Prince R.(1989), Firm incentives to promote technological change in pollution control, *Journal of Environemental Economics and Management*, 17, p. 247-65

Min Ha Duong (ed), *Captage et Stockage du CO2, enjeux techniques et sociaux en France*, Editions Quae, 2010.

Möllersten K., Yan J, Moreira JR (2003), Potential Market Niches for biomass energy with Co_2 capture and storage : opportunities for energy supply with negative Co_2 , *Biomass & Bioenergy*, p. 273-285.

Möllersten K., Gao L., Yan J (2006), Co_2 capture in pulp and paper mills : Co2 balances and preliminary cost assesmment, *Mitigation and Adaptation Stratégies for Global Change* 11, 1129-1150.

Mulder P., De Droot H., Hofkes M. (2003), Explaining slow diffusion of energy-saving technologies : a vintage model with returns to diversity and Learning-by-using, *Resource and Energy Economics*,25(2003) p. 105-126

Newell,R. Jaffe A., Stavins R (199), The induced innovation hypothesis and energy saving technological change, *The Quartely Journal of Economics*, 114(3), 941-975

Oltra V. et Saint Jean M. (2009), Innovations environnementales et dynamique industrielle, Cahiers du GRETHA, n°2009-22, Bordeaux.

Otto M. et Reilly J., Directed technical change and the adoption of CO_2 abatement technology : the case of CO_2 capture and Storage, , *Energy Economics*, (30) 2008, pp. 2879-2898.

Palmer K., Oates W., Portney P.(1995), Tightening environmental standards : the benefit-cost or the no-cost paradigm ?, *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), p. 119-132

Popp D., Newell R. et Jaffe A. (2009) , Energy, the environment and technological change, NBER Working paper, N°14832, Avril 2009.

RECIPE (2009), The Economics of Decarbonization, Report on Energy and Climate Policy in Europe, 2009.

Schubert K. , *Pour la taxe Carbone, la politique économique face à la menace climatique*, CEPREMAP, Editions de la Rue d'Ulm, 2009.

Shapiro et Varian ,(2000), *Economie de l'information, guide stratégique de l'économie des réseaux*, De Boeck

Sorrell S.(2007), The rebound effect : an assessment of the evidence for economic-wide energy

savings from improved energy efficiency, report to the Sussex Energy Group for the Technology and Policy assessment function of the UK Energy Research Center.

Tirole J, Politique Climatique : une nouvelle architecture internationale, Rapport CAE, Octobre 2009.

Rai V, Victor D., Thurber M.(2009), Carbone capture and storage at scale; lessons from analogous energy technologies, Program on Energy and Sustainable Development, Stanford University, Février 2009.

Van Alphen, K., Hekkert M, Turkenburg W., Accelerating the deployment of carbon capture and Storage technologies by strengthening the innovation system (2010), *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (2010), pp. 396-409.