



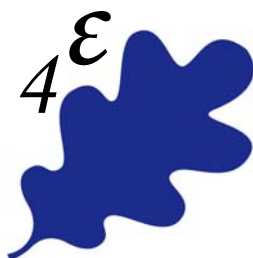
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère de l'Écologie
et du Développement Durable

Document de travail

ETUDES – METHODES – SYNTHESSES



COMMENT LES POLITIQUES PUBLIQUES PEUVENT-ELLES ACCELERER LE PROGRES SUR LES TECHNOLOGIES DE LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

SERIE ETUDE

05 – E04

AURELIE VIEILLEFOSSE

Site internet : <http://www.ecologie.gouv.fr>
20 avenue de Ségur – 753002 Paris 07 SP

DIRECTION DES ETUDES ECONOMIQUES ET DE L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

SOMMAIRE

I	<u>Le progrès technique.....</u>	4
I. 1.	Progrès technique, R&D et effet d'apprentissage	4
I. 2.	Le niveau de R&D n'est pas optimal socialement : imperfections du marché	6
I. 3.	Justification d'une action publique, limites	9
I. 4.	Création d'un leader mondial	9
II	<u>Les politiques publiques visant à accélérer le progrès dans les technologies sobres en carbone.....</u>	11
II. 1.	Les politiques axées sur la demande.....	11
II. 2.	Les politiques axées sur l'offre.	
III	<u>Coopération internationale sur la R&D.....</u>	24
III. 1.	Accord sur la recherche sur les technologies sobres en carbone	24
III. 2.	Approche par les normes, les standards.....	27
IV	<u>Comment encourager la diffusion de la technologie vers les PED?..</u>	
IV. 1.	La mesure du problème : croissance des émissions dans les PED.....	30
IV. 2.	Les transferts de technologie.....	31
IV. 3.	Les transferts de technologie dans le cadre de la convention cadre sur les changements climatiques.....	32
IV. 4.	L'aide publique au développement et les investissements directs à l'étranger.....	36
V	<u>Conclusion.....</u>	41
VI	<u>Bibliographie.....</u>	42

RÉSUMÉ

En l'absence d'intervention de l'Etat, le niveau de R&D des acteurs privés pour lutter contre le changement climatique ne sera pas optimal du point de vue de la société à cause de différentes imperfections du marché et parce que le changement climatique est une externalité dont le coût n'est pas encore pris en compte. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place des politiques publiques.

Les instruments économiques permettent de diminuer l'écart de prix entre les technologies sobres en carbone et les technologies fossiles. Ils accélèrent le progrès technique en améliorant la rentabilité de certains marchés et en favorisant l'apprentissage par la pratique. Ils encouragent aussi la R&D des entreprises en statique et dynamique. La mise en place d'un signal prix est essentielle pour canaliser le progrès technique dans un sens favorable à l'environnement car en l'absence de signal prix, le progrès technique risque de faire baisser les coûts d'utilisation d'un service et donc d'augmenter son utilisation (effet rebond).

Cependant, le signal prix carbone actuel n'est probablement pas fixé à un niveau qui reflète intégralement l'externalité qu'il cherche à corriger. Plusieurs raisons l'expliquent, notamment la difficulté de faire accepter un signal prix élevé aux consommateurs. De plus, dans le cas du changement climatique, il est impossible de déterminer le signal prix optimal avec précision car l'évaluation des dommages est un exercice très difficile, voir impossible à l'heure actuelle. Dans ces conditions, il est utile de mettre en place des politiques complémentaires au signal prix comme les subventions à la recherche, en particulier dans les domaines où les inventions sont encore éloignées du stade de la commercialisation et de la diffusion massive (pile à combustible et filière hydrogène, capture et séquestration du carbone, photovoltaïque..).

La question se pose aussi de savoir si la recherche sur ces technologies sobres en carbone devrait donner lieu à une collaboration internationale plus active puisque ces technologies ont des aspects de bien public global. En fait, il apparaît qu'il existe déjà de nombreuses initiatives de collaboration internationale sur la technologie (initiatives américaines ou initiatives de l'AIE) et qu'il semble surtout important à ce stade de chercher à les renforcer plutôt que d'en créer de nouvelles.

La diffusion des technologies propres vers les PED est un des enjeux majeurs des politiques de lutte contre le changement climatique dans les 30 prochaines années. La convention cadre sur les changements climatiques a mis en place un certain nombre de mécanismes pour encourager les transferts de technologie, notamment le fonds pour l'environnement mondial et le mécanisme de développement propre, qui offrent des perspectives très intéressantes. Néanmoins, étant donnée l'ampleur du défi à relever, d'autres pistes devront être explorées : verdir l'aide publique au développement ou impliquer les agences de crédits à l'exportation qui peuvent avoir un impact significatif sur le développement des technologies propres.

I – LE PROGRES TECHNIQUE

1. Progrès technique, R&D et effet d'apprentissage

Selon Schumpeter (1942), le progrès technique se fait en trois étapes :

- La première étape est celle de l'invention, c'est à dire la production de connaissance nouvelle. L'inventeur a une idée, il va créer un prototype en fonction de cette idée et, en général, déposer un brevet ;
- La deuxième étape est celle de l'innovation, c'est à dire la création d'un nouveau produit ou procédé, effectivement vendu ou mis en œuvre. C'est dans cette étape qu'a lieu la commercialisation initiale du produit ;
- La troisième étape est celle de la diffusion de la nouvelle technologie, c'est à dire l'adoption du produit à grande échelle, par une large population d'agents.

L'invention et l'innovation sont en général liées à des efforts importants de recherche et développement (R&D) de la part des entreprises (*learning by searching*). Il est à noter que l'innovation a en général lieu dans les pays très industrialisés : selon David Popp (2002), en 1998, 85 % de la R&D de l'OCDE avait lieu dans seulement 7 pays (sur 30), en particulier 44 % de la R&D a eu lieu aux Etats-Unis.

Dans la phase de diffusion, les progrès sont principalement faits par l'apprentissage par la pratique (*learning by doing*) et l'apprentissage par l'usage (*learning by using*). En effet, lorsque les firmes deviennent plus familiarisées avec un procédé, elles découvrent des moyens de réduire leurs coûts. De plus, elles améliorent leurs produits grâce aux retours et demandes des utilisateurs.

La pénétration des nouvelles technologies sur le marché peut être représentée par une courbe en S (figure 2). Dans un premier temps, la pénétration est très lente car peu de gens connaissent la nouvelle technologie et la technologie est encore chère. Plus le nombre de personnes ayant adopté cette technologie devient élevé et plus les coûts de production diminuent et la pénétration s'accélère. Il y a une externalité positive d'adoption de la technologie.

Figure 1 – The S-shaped diffusion curve

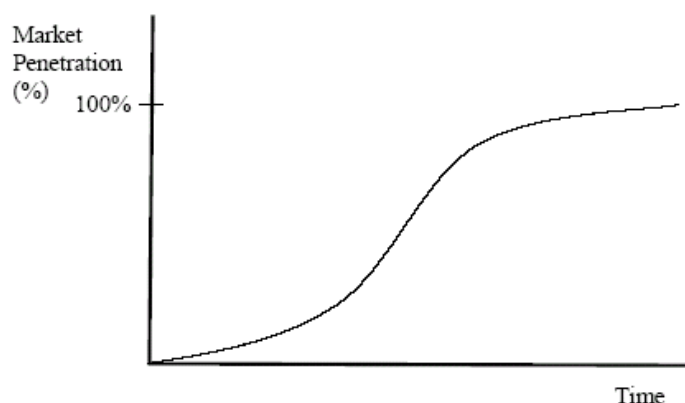


Figure 1 : Courbe de diffusion des nouvelles technologies Source : Rogers, (1983)¹

¹ Rogers(1983), *Diffusion of Innovations*.

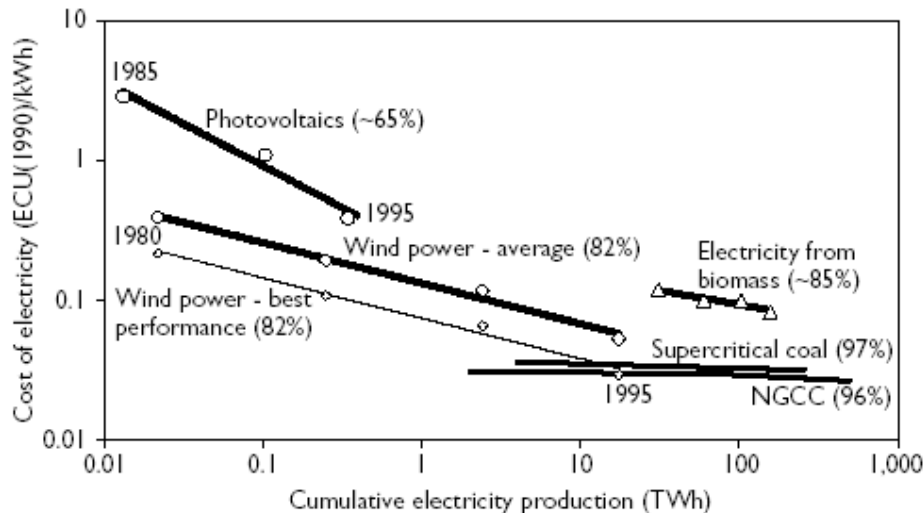


Figure 2 : Evolution des coûts de différentes technologies de production d'électricité entre 1980 et 1995 en Europe, (Source : AIE)

La Figure 2 montre la diminution des coûts en Europe pour différentes technologies de production d'électricité. Lorsque la production photovoltaïque installée en Europe a doublé, le coût de cette technologie a été diminué de 35 %. Pour l'éolienne, les coûts ont diminué de 18 % avec un doublement de l'expérience. Pour la biomasse, les coûts ont diminué de 15 %. La majeure partie des réductions de coûts pour l'énergie photovoltaïque a été due à une amélioration du produit par de la R&D alors que dans l'éolien, les progrès ont été aussi le fait d'apprentissage par les utilisateurs, en particulier sur les choix des sites d'implantation. Selon Lako (2005), les taux d'apprentissage entre 1990 et 2000 pour un doublement de la capacité éolienne installée ont été de 5,4 % par l'apprentissage par la pratique et 12,6 % par l'apprentissage par l'usage. (On note que le photovoltaïque coûte encore très cher mais que sa diminution de coût a été très forte. Selon les projections d'ECOFYS, le photovoltaïque pourrait devenir moins cher que l'éolien en 2030.)

La modélisation linéaire du processus d'innovation technique est une approximation simplificatrice. En réalité, il y a des boucles de rétroaction (*feedback loops*) : les idées nouvelles permettent la commercialisation de produits nouveaux, lesquels à leur tour suscitent de nouvelles idées (figure 3.)

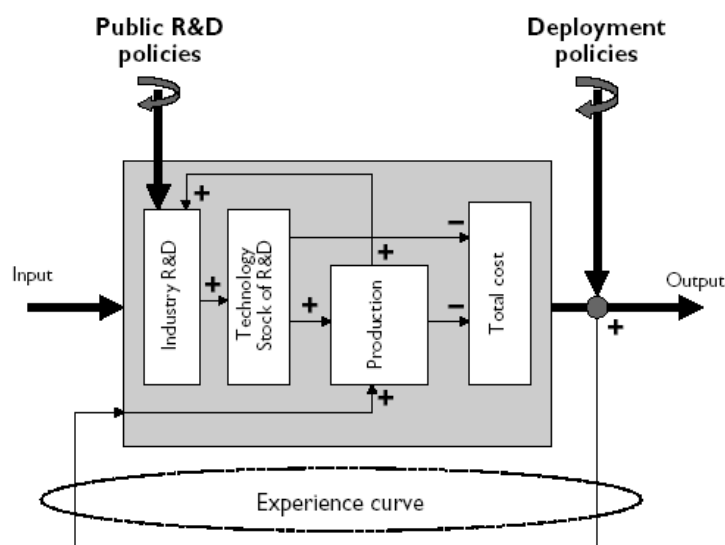


Figure 3 : Système d'apprentissage, influence des politiques publiques (Source : AIE)

Les innovations radicales (de rupture) cristallisent souvent l'imaginaire des populations et des décideurs. Pourtant, les innovations incrémentales (progrès en continu) ont souvent des impacts beaucoup plus importants, en terme économique, que les innovations radicales : le progrès technique est avant tout une série de petits pas en avant innovants (Alic et al 2003). La figure 4 fait ressortir que 4 technologies de rupture sont actuellement envisagées dans l'énergie (Nucléaire, pile à combustible, hydrogène, fusion nucléaire) mais qu'il existe aussi de nombreuses technologies qui nécessitent surtout des progrès incrémentaux (Biocarburants, Véhicule hybride, Nouveaux matériaux, Séquestration du carbone, Photovoltaïque...). Ces technologies sont déjà au stade de la diffusion, c'est à dire de l'apprentissage par la pratique et par l'usage.

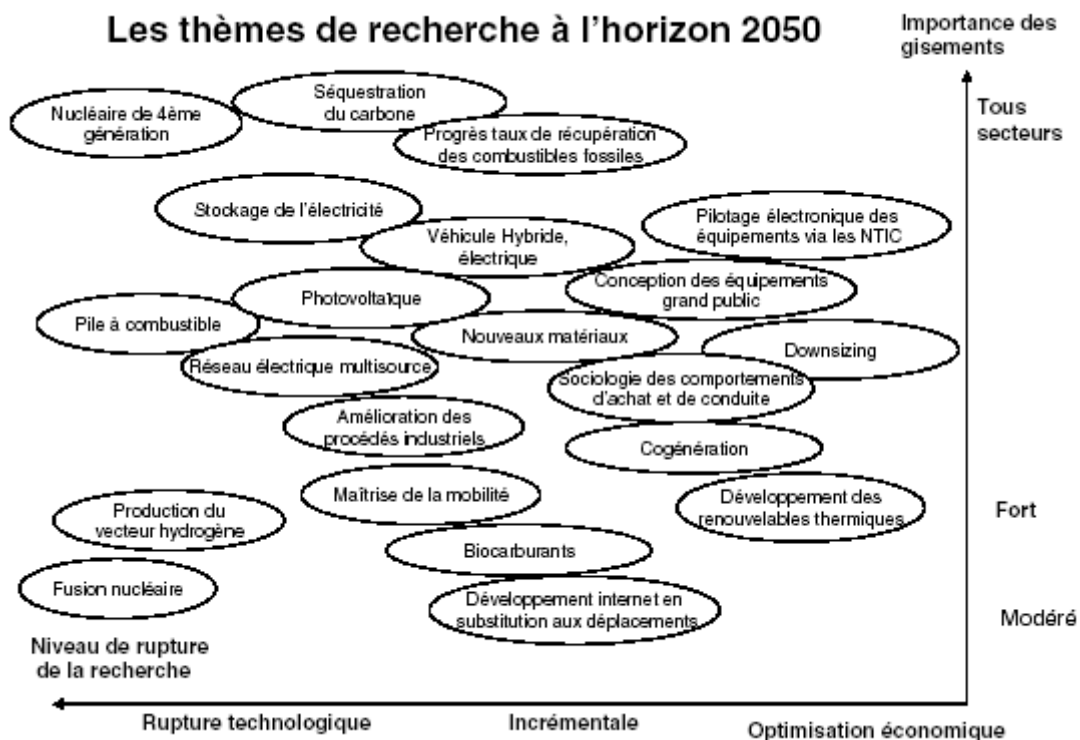


Figure 4 : Les nouvelles technologies de l'énergie, (Source : rapport Chambolle)

2. Le niveau de R&D n'est pas optimal socialement : imperfections du marché

2.1. Dilemme entre l'appropriation de la connaissance et sa diffusion

La connaissance est un bien public non rival², partiellement exclusif. En effet, selon Arrow (1962), la connaissance est difficilement contrôlable : elle tend à se diffuser et à être utilisée par d'autres agents que celui qui en a assuré la production. De plus, la connaissance est cumulative : la production de savoir nouveau repose largement sur les savoirs existants.

En l'absence de droits de propriété, un inventeur ne pourra pas, en général, s'approprier tous les bénéfices générés par son invention et ses concurrents bénéficieront partiellement de son invention sans avoir eu à en payer les coûts de R&D (*spillover effect* ou effet de diffusion).³ Les retours pour la société des efforts de R&D d'un inventeur sont donc supérieurs aux retours que

² Le coût marginal d'utilisation d'une connaissance est nul ce qui constitue une forte incitation à l'imitation.

³ Selon Sijm (2004), on estime en général qu'un inventeur profite de 50 % des bénéfices générés par son invention.

celui-ci perçoit.⁴ Cela implique que l'investisseur ne va pas se placer à un niveau d'investissement en activités innovantes optimal socialement.

Pour corriger en partie cette imperfection du marché, les gouvernements acceptent d'accorder des brevets aux inventeurs, qui constituent des monopoles de courte durée sur leurs inventions. Le brevet reflète la recherche d'un équilibre entre la protection de l'inventeur, de manière à stimuler la création de nouvelles connaissances, et la diffusion de savoir, pour que la connaissance soit exploitée de façon optimale. Dans la mesure où l'encouragement à l'innovation se fait en échange de la mise en place d'un monopole, c'est une solution imparfaite de second rang.

Le système des brevets

Un brevet est un titre légal qui octroie à la personne qui le possède le droit exclusif de faire une utilisation commerciale de l'invention brevetée. Pour breveter une invention, l'inventeur doit prouver que son invention est non évidente, qu'elle fait preuve de nouveauté et qu'elle peut être utilisée à des fins commerciales (ie une idée n'est pas brevetable en tant que telle, elle doit avoir une application industrielle). En général, les brevets offrent une protection de 20 ans après laquelle l'invention passe dans le domaine public. Les brevets sont particulièrement légitimes pour tous les produits qui demandent des efforts de R&D significatifs et qui peuvent être aisément copiés, comme la recherche pharmaceutique.⁵

Le brevet permet à son titulaire de tirer un revenu de son invention soit en exploitant lui-même l'invention de manière exclusive, soit en la vendant, soit en cédant des licences (exclusives ou non)⁶ à d'autres agents qui prendront en charge l'exploitation économique de l'invention. En effet, un inventeur n'est souvent pas l'entité la plus appropriée pour commercialiser l'innovation ou l'enrichir à l'aide d'innovations complémentaires. Le brevet facilite grandement l'octroi de licences car il définit les droits de propriété de façon plus claire que le secret de fabrication. L'inventeur peut aussi laisser dormir son invention, néanmoins une somme fixe devra être versée au moment du dépôt ainsi qu'une taxe annuelle d'entretien du brevet.

De plus, les brevets permettent une diffusion rapide des idées nouvelles dans la société.⁷ La demande de brevet comprend une description plus ou moins précise de l'innovation, qui peut aider d'autres innovateurs non pas à la répliquer, mais à poursuivre la recherche dans la voie qui a été ouverte. Pour les grandes entreprises, les bases de données de brevet accessibles en lignes sont un formidable outil de veille technologique et concurrentielle.

⁴ Les études empiriques trouvent des taux de rendement très élevés pour le taux de retour social de la R&D : en général de l'ordre de 25-30 %, mais ils peuvent être supérieurs si l'on considère des mesures plus larges des bénéfiques. Les taux de retours privés sont plutôt de l'ordre de 10 à 15 % (Betbèze 2005).

⁵ Le Commissariat général au plan (2002) cite une étude effectuée auprès des directeurs de R&D de nombreuses entreprises : selon ces directeurs, le système de brevet a peu d'impact sur l'effort d'innovation des entreprises sauf dans le domaine de la pharmacie et de la chimie où 38 à 60 % des innovations n'auraient pas vu le jour sans brevets.

⁶ Une autorité publique qualifiée pour cela (par exemple l'autorité responsable en matière de santé publique) peut enjoindre au titulaire d'un brevet (par exemple sur un vaccin d'importance cruciale) d'accorder une licence obligatoire à un opérateur que l'autorité publique désigne, moyennant une rémunération qu'elle fixe. Il s'agit d'une mesure de dernier recours, qui n'est envisagée que si le titulaire du brevet abuse de sa position de monopole temporaire au regard de l'intérêt public en cause.

⁷ Certains entreprises, comme Air Liquide et St Microelectronics, considèrent que la diffusion de l'information dans la société est essentielle puisqu'elles ont pour politique de mettre dans le domaine public toutes les inventions à usage marchand qu'elles ont décidé de ne pas breveter.

C'est pourquoi beaucoup d'innovations, en particulier celles de processus⁸, ne sont pas brevetées, mais simplement gardées au sein de l'entreprise, les employés étant tenus au secret qu'ils restent dans l'entreprise ou non. Le secret de fabrication permet à l'inventeur de protéger des innovations mineures qui, en principe, ne satisferaient pas les critères de brevetabilité. Il a aussi l'avantage d'être moins coûteux qu'un brevet, et d'avoir une durée indéfinie (cf. la recette de fabrication de Coca-Cola).⁹ Enfin, contrairement au brevet, il ne signale pas d'information aux concurrents soit sur la profitabilité du marché, soit sur la technologie.

2.2. Autres facteurs

Nombre d'innovations ne trouvent d'applications qu'à un horizon de temps qui n'est pas toujours compatible avec celui des entreprises, les exigences du marché et celles de l'actionnariat (les exigences de l'actionnariat pouvant différer selon que le type d'investisseurs, *business angel* ou capital risque). C'est pourquoi **l'Etat prend en général en charge la recherche fondamentale** : le rendement privé est très faible (l'appropriation privée des résultats fondamentaux est très limitée et leurs applications économiques directes sont souvent marginales) alors que le rendement social est élevé (les connaissances de base diffusent dans des applications lointaines mais nombreuses en aval).

En ce qui concerne la recherche appliquée, les travaux sur les taux de retour des investissements en R&D trouvent des taux de retour privés de l'ordre de 10 à 15 %, voire 30 % dans certaines études (Betbèze 2005). Si le taux de retour privé est si élevé, pourquoi les entreprises n'investissent pas plus dans la R&D ? Les explications avancées sont multiples :

- Les entreprises, en particulier les PME, sont averses au risque. Un taux de retour moyen élevé ne suffira pas à susciter l'investissement, si, comme c'est le cas dans certains secteurs, seul un infime pourcentage des recherches donne lieu à une exploitation commerciale ;
- Il existe une imperfection du marché des capitaux à cause de l'asymétrie d'information : l'innovateur a une information meilleure sur la valeur de son projet que les investisseurs potentiels extérieurs à l'entreprise mais il ne peut pas trop dévoiler son projet à ces derniers sans courir le risque de perdre l'exclusivité de son invention ;
- Il faut que la propriété de l'innovation soit bien définie pour que l'investisseur en R&D récolte les fruits de ses dépenses, mais aussi que les différents mécanismes de propriété intellectuelle fonctionnent bien, avec des coûts réduits.

C'est pourquoi, selon Beffa (2005), **l'Etat a donc aussi un rôle à jouer pour favoriser l'investissement industriel dans des projets qui contiennent un risque technologique important**. Ce rôle est d'autant plus utile que les projets sont risqués, que les montants sont importants et les externalités technologiques élevées. Pour ce faire, l'Etat peut se charger lui-même du financement de nouveaux projets (cas des grands programmes historiques) ou contribuer à diminuer les risques auxquels s'exposent les entreprises, en fournissant un

⁸ Dans le cas d'une innovation de procédé, l'innovateur peut maintenir hors de portée de ses concurrents son nouveau dispositif, en rendant difficile la reproduction, voire l'identification même. Cela est plus difficile dans le cas de l'innovation de produit puisque les concurrents peuvent procéder au démontage de l'objet (*reverse engineering*).

⁹ Ainsi, selon le Commissariat général au plan, les PME françaises choisissent en général d'ignorer le système des brevets pour leur invention : seulement 2 % des entreprises française produisent 60 % des brevets étendus à l'étranger.

financement stabilisé et incitatif ou encore permettre l'existence d'un marché public. **L'Etat a aussi un rôle à jouer dans la coordination des acteurs privés et publics autour d'un projet de production.**

3. Justification d'une action publique, limites

Les arguments développés dans les sections 1.1 et 1.2 justifient une intervention publique de l'Etat pour encourager la R&D. Néanmoins, la légitimité de cette intervention repose sur une double hypothèse :

- La première suppose que l'État est un planificateur bienveillant qui va tenter d'ajuster le niveau de R&D à un niveau socialement optimal, selon les secteurs. Or, les aides à la R&D industrielle n'ont pas toujours correspondu à cette hypothèse. En France, des directions entières du ministère de l'Industrie étaient calquées sur la structure de quelques « champions nationaux » que ce ministère était chargé de soutenir (Betbèze 2005).
- La deuxième suppose que l'État devrait être bien informé. Pour atteindre le niveau de R&D socialement optimal, il devrait être capable d'identifier les externalités, de les mesurer, et de s'assurer que les bénéfiques vont bien à la société dans son ensemble. Là aussi, on peut douter qu'il en ait les moyens, d'autant plus qu'il y a asymétrie informationnelle avec les entreprises. Ainsi, l'Etat peut mal estimer son action et soutenir des projets que l'évolution de la demande ne valide pas, alors que les entreprises ne se seraient pas lancées dans de tels investissements.

C'est pourquoi, selon Betbèze (2005), l'action de l'État doit principalement porter là où :

- les connaissances ont des effets cumulatifs et sont source d'une innovation verticale sur laquelle s'appuieront d'autres innovations, fussent-elles à plus long terme ;
- les signaux du marché ne donnent pas de bonnes incitations au secteur privé, alors que les gains collectifs sont importants ;
- la recherche peut améliorer la gouvernance, que ce soit en apportant à l'État une information essentielle, ou bien en garantissant son autonomie vis-à-vis d'autres entités, nationales ou étrangères.

Ceci plaide pour des moyens publics axés sur la recherche fondamentale, et sur une recherche technologique susceptible d'être utilisée de manière transversale et cumulative. Ceci plaide également pour une recherche publique concentrée dans des domaines où les gains collectifs sont importants (environnement, santé dans des secteurs où la demande n'est pas directement solvable, etc.) Beffa (2005) suit cette direction puisqu'il préconise dans son rapport sur l'innovation que l'Etat investisse dans des grands programmes dans le domaine de la santé (maladies infectieuse et dégénératives), dans le domaine de l'énergie et environnement (pile à combustible et filière hydrogène, solaire photovoltaïque, biocarburants, voiture économe et propre, capture et séquestration du CO₂) et enfin dans le domaine de l'automatisation du contrôle aérien et des réseaux sécurisés à haut débit.

4. Création d'un leader mondial¹⁰

Comment expliquer que les industries d'un pays arrivent à s'imposer comme des leaders mondiaux dans certains domaines? Les pays nordiques dominant le marché des téléphones

¹⁰ *Lead market and regulation: a framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations.* Beise, M; Rennings, K.

portables, les Etats-Unis dominent le secteur informatique. Le Danemark domine le marché des éoliennes, suivi par l'Allemagne.

Le pays où l'innovation démarre gagne souvent un avantage qui lui permet de créer un leader qui s'impose ensuite au niveau mondial. Cela s'explique par le fait que le taux de pénétration de l'innovation est beaucoup plus élevé dans le pays où elle a démarré ; les entreprises ont donc plus de connaissance du marché et des retours des utilisateurs. Les entreprises gagnent aussi en expérience sur la production, ce qui leur confère un avantage en terme de coût (le prix a baissé). Les entreprises dans les autres pays qui cherchent à imiter l'invention gardent en permanence un certain retard sur le leader qui poursuit son avancée (c'est le cas en France pour le nucléaire, l'automobile, l'eau...)

Les éoliennes au Danemark : histoire d'une réussite

Au début des années 1980, l'Allemagne, le Danemark et les Etats-Unis ont essayé de développer de très grosses turbines éoliennes et ont obtenu de très mauvais résultats. En parallèle à ces travaux, les Danois ont continué à soutenir le déploiement de petites turbines par des incitations publiques. Les producteurs de petites éoliennes danoises ont gagné en expérience et ont pu progressivement augmenter la taille de leurs turbines, pour atteindre aujourd'hui des tailles comparables aux grands projets des années 1980. Le Danemark a gagné un avantage comparatif car il a commencé environ 5 ans avant les autres pays à développer les éoliennes. Les industriels danois ont ensuite rapidement pu exporter leurs technologies quand les autres pays ont mis en place les premières politiques d'énergie renouvelables, aux Etats-Unis notamment. On estime que le déploiement des éoliennes a coûté au Danemark 1,4 milliards de dollars en subventions entre 1993 et 2001 et que les revenus des compagnies éoliennes danoises étaient de 2,7 milliards de dollars en 2001, notamment grâce aux exportations.

Il est intéressant de noter que l'Allemagne et l'Espagne ont profité du savoir faire danois par un effet de diffusion puisque certaines compagnies allemandes et espagnoles proviennent de joint venture avec des compagnies danoises.

Néanmoins, l'adoption d'une technologie par un pays n'entraîne pas toujours un succès en terme d'exportations. Ainsi, certaines innovations (ie minitel) sont adoptées dans un pays et un jour elles sont remplacées par l'innovation qui domine le marché mondial (ie internet).

Les raisons qui peuvent expliquer l'émergence d'un leader mondial sont les suivantes :

- Le pays dispose d'un avantage sur la demande (par exemple la faible densité de population en Scandinavie a encouragé le développement des téléphones portables qui étaient plus rentables que l'installation de réseau de lignes fixes) ;
- Le pays dispose d'un avantage à l'export : plus deux pays sont proches culturellement, socialement et économiquement et plus la possibilité qu'une innovation adoptée dans un pays soit adoptée dans l'autre est élevée ;
- La structure du marché et son degré de concurrence jouent aussi un rôle important.

II. LES POLITIQUES PUBLIQUES VISANT A ACCELERER LE PROGRES DANS LES TECHNOLOGIES SOBRES EN CARBONE

Les politiques publiques de lutte contre le changement climatique visent à infléchir les émissions de gaz à effet de serre sur le court terme et à les réduire (d'un facteur 2 à 4) sur le plus long terme. Dans l'immédiat, les gouvernements cherchent surtout à encourager l'adoption des technologies existantes, qui ne sont pas utilisées à cause de défaillances du marché. Sur le long terme, ils cherchent à impulser le développement de technologies vertes, donc à accélérer le progrès technique (progrès technique induit ou endogène).

Deux grandes familles de politiques publiques peuvent encourager le progrès technique :

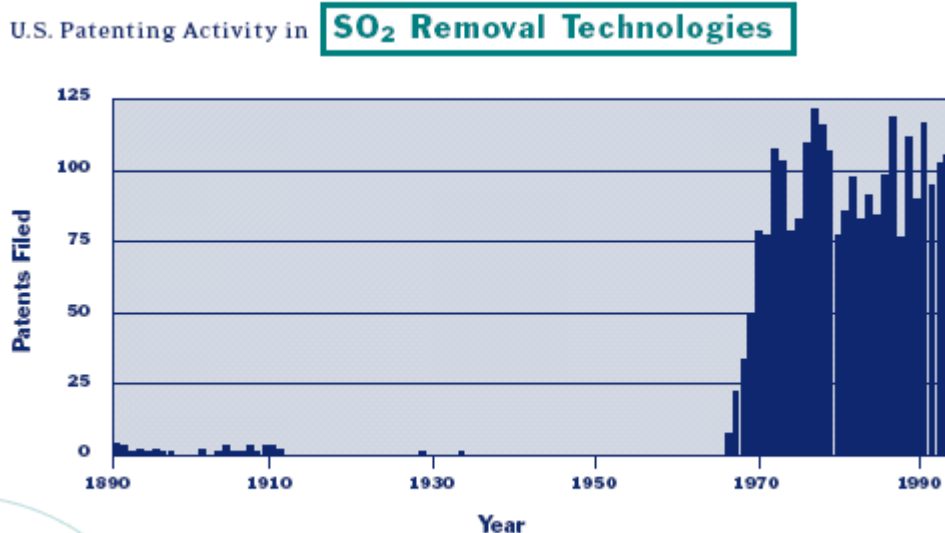
- les politiques axées sur la demande comme les normes, les taxes, les marchés de permis ou les subventions (*pull policies*) ;
- Les politiques axées sur l'offre comme les subventions à la R&D, la R&D dans le secteur public, le renforcement des brevets, les prix à l'innovation (*push policies*).

1. Les politiques axées sur la demande

1.1. Quelques exemples

L'impact des politiques de demande sur l'innovation a été relativement marqué lors de la mise en place des régulations sur le SO₂ aux Etats-Unis. Lorsqu'on examine le nombre de dépôts de brevets sur des équipements de réduction des émissions de SO₂ aux Etats-Unis (figure 3), on observe une activité importante de dépôts de brevets dès le lancement des premières politiques en 1970 (normes dans un premier temps et ensuite marché de permis).

Figure 3



Source: M.R. Taylor, E.S. Rubin, and D.A. Hourshel, "Effect of Government Actions on Technological Innovation for SO₂ Control," *Environmental Science & Technology*, Vol. 37, No. 20, 2003, pp. 4527-4534.

Figure 5 : Activité de dépôt de brevet sur des équipements de réduction du SO₂ aux Etats-Unis (Source : Alic J. et al)

En Norvège, la mise en place d'une taxe sur le CO₂ sur l'industrie d'extraction pétrolière, à un niveau relativement élevé (35 €/ tCO₂), a amené Statoil à mettre en place un des premiers projets de capture et séquestration du carbone sur une plateforme offshore car ce projet est alors devenu rentable.

Popp (2002) montre que le prix de l'énergie a eu un impact sur l'activité de recherche aux Etats-Unis. Après la crise de l'énergie en 1973, on voit sur la figure 4 que le nombre de dépôts de brevets sur les technologies solaires est passé de 10 en 1972, à 36 en 1973, 104 en 1974, 218 en 1975, et 367 en 1977.

Figure 2 – Induced Innovation and Energy Prices

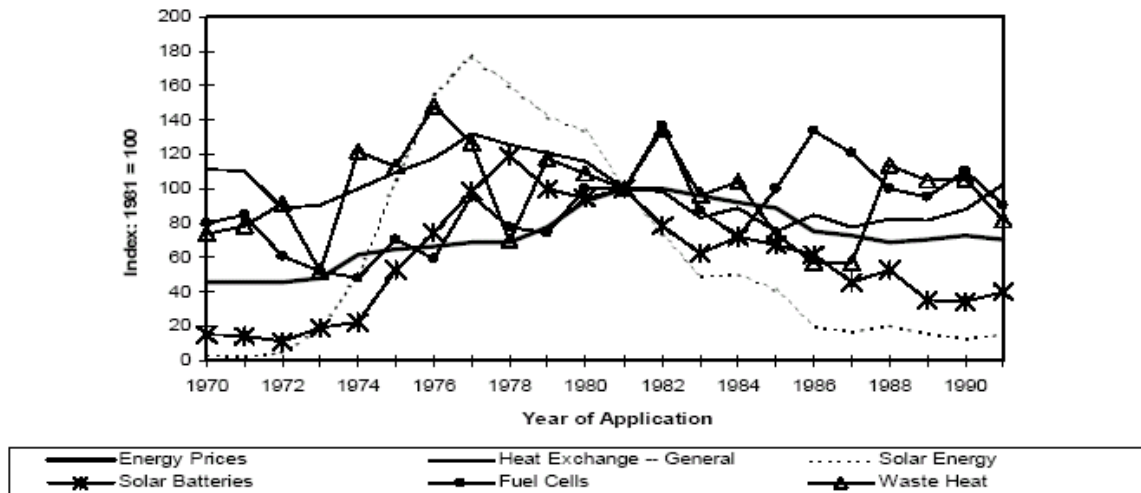


Figure 6 : Activité de dépôt de brevet sur l'énergie aux Etats Unis entre 1970 et 1990

Popp (2001) estime que lorsque la consommation d'énergie est réduite suite à un changement de prix de l'énergie, 1/3 de la réduction est due au progrès technique et 2/3 à des substitutions de facteurs. Il montre aussi que le changement de prix augmente l'activité de R&D mais d'un facteur moins que proportionnel (0,35).

1.2. Les politiques axées sur la demande accélèrent la diffusion et diminuent les coûts

La mise en place d'un instrument économique qui internalise l'externalité changement climatique (comme le marché de permis européen ou une taxe sur les émissions de CO₂) permet de réduire la différence de prix entre les technologies basées sur l'énergie fossile et les technologies sobres en carbone. Cela entraîne une diffusion plus rapide des technologies sobres en carbone qui existaient déjà mais qui étaient encore trop chères en comparaison des technologies fossiles équivalentes.

Cette diffusion des technologies propres a ensuite pour conséquence une baisse de prix des technologies sobres en carbone par l'effet d'apprentissage par la pratique et par l'usage.

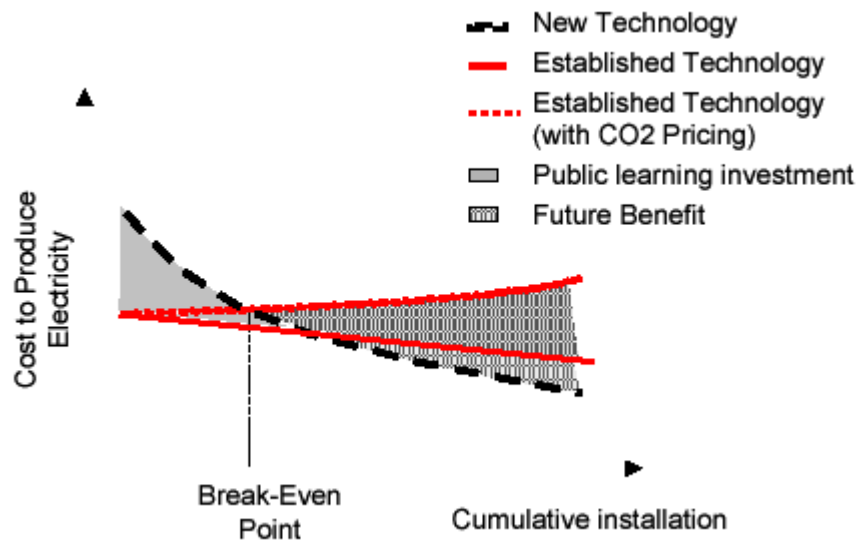


Figure 7 : Apprentissage et bénéfices futur d'une invention

La figure 7 fait ressortir les différents effets : le coût de la nouvelle technologie diminue avec le temps, le coût de la technologie « fossile » augmente puisque l'externalité CO₂ est progressivement intégrée. La technologie verte devient compétitive lorsqu'elle dépasse le point « *break even* ». L'internalisation du coût du CO₂ permet de passer ce point plus rapidement.

1.3. Le signal prix est essentiel pour limiter l'effet rebond

La mise en place d'un signal prix est d'autant plus justifiée qu'il existe un « effet rebond » : **les agents économiques utilisent plus un service quand l'efficacité énergétique augmente puisque les coûts d'utilisation sont réduits.**

Ainsi, ces dernières années, les voitures ont beaucoup progressé en terme d'efficacité énergétique. Cependant, les consommations au km des voitures n'ont pas diminué autant que le progrès l'aurait permis car parallèlement, les voitures sont devenues plus lourdes (pour des raisons de confort et de sûreté). Cette tendance est moins marquée en Europe qu'aux Etats-Unis, ce qui s'explique en partie par le fait que les prix du carburant ont toujours été élevés en Europe, contrairement aux Etats-Unis.

La mise en place d'un signal prix permet d'éviter ou tout au moins de limiter cette hausse de la consommation induite par la baisse de coût liée au progrès technique. **Le signal prix apparaît donc essentiel pour canaliser le progrès technique dans un sens favorable à la réduction des externalités.**

1.4. Intérêt et limite du signal prix

En parallèle du marché de permis européen, l'Europe a mis en place des politiques plus spécifiques comme la directive sur l'énergie renouvelable et la directive sur les biocarburants qui visent à accélérer la diffusion de ces deux technologies. Ces deux directives sont mises en œuvre dans les Etats membres via des politiques de subvention (en France, obligation et tarif de rachat pour l'électricité renouvelable et défiscalisation pour les biocarburants). Les gouvernements espèrent que la diffusion des biocarburants et des énergies renouvelables

permettra des réductions de coûts, qui rendront alors inutiles les subventions, et permettront ensuite une diffusion encore plus large de ces technologies sobres en carbone.

Il est à noter que les politiques de subvention présentent deux défauts majeurs pour les gouvernements. **Premièrement, il est nécessaire de trouver des financements dans un contexte où les finances publiques subissent des contraintes importantes. Deuxièmement, une fois mises en place, ces politiques sont très difficiles à supprimer car elles créent des rentes.**

R. Newell et C. Fischer (2004) s'interrogent sur les raisons pour lesquelles des subventions sont mises en place pour encourager le développement des énergies renouvelables dans de nombreux pays (aux Etats-Unis, au Canada, en Europe, en Corée...) alors que le prix du carbone est un instrument optimal pour inciter au développement des énergies propres. Ils examinent avec un modèle simple les coûts de différents types d'incitations au développement des énergies propres et leur impact sur les émissions de CO₂.

Dans leur modèle, **un prix du carbone** de \$6,8/tCO₂ réduit les émissions de 5,8 % par rapport au scénario de référence. Cette réduction est due d'une part à une réduction de l'intensité des émissions en combustible fossile de 3 %, et d'autre part à une réduction de la consommation d'électricité de 2,3 %. Le prix du carbone a l'avantage d'encourager les consommateurs à diminuer leur consommation. Il incite aussi les producteurs d'énergie renouvelables à augmenter leur production et investir dans la recherche. Le prix du carbone pose cependant un problème de type redistributif : l'augmentation du prix de l'énergie pèse sur les consommateurs s'il n'y a pas de compensations de revenus.

Une subvention à l'électricité renouvelable (type tarif de rachat) doit être six fois supérieure à la taxe pour atteindre la même réduction par rapport au scénario de référence. En effet, lorsque la subvention est mise en place, les consommateurs ne sont pas incités à réduire leur consommation d'électricité. **Aussi, pour atteindre le même niveau de réduction des émissions de CO₂, le parc de production d'énergies renouvelables doit être 12 fois plus élevé.** La subvention à l'énergie renouvelable est neutre pour les consommateurs d'électricité mais en revanche le coût pour les contribuables est supérieur de 50 % aux gains des producteurs d'énergie renouvelable.

Une politique de subvention de la recherche sur les énergies renouvelables est la politique la plus coûteuse. En effet, pour atteindre le même niveau de réduction en terme d'émissions de gaz à effet de serre, les coûts des technologies renouvelables doivent être diminués de 62,1% par rapport à la référence (afin que ces technologies deviennent plus attractives que les technologies fossiles).

Ce modèle simple fait bien ressortir l'intérêt de la mise en place d'un signal prix. Newell et Fischer soulignent cependant les raisons pour lesquelles les gouvernements mettent en place des politiques de subvention. Premièrement, les gouvernements craignent qu'un prix élevé du carbone diminue l'activité économique des industries intensives en énergie, surtout dans un contexte où les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne sont pas mises en place dans tous les pays. Deuxièmement, un prix du carbone élevé peut faire peser un coût important sur les consommateurs (en particulier les plus pauvres) s'il n'y a pas de politique de redistribution. Troisièmement, les défaillances du marché (expliquées dans la partie 1) impliquent qu'un signal prix n'est pas toujours suffisant pour encourager la recherche sur les technologies propres.

On peut rajouter un dernier argument : les politiques de subvention aux énergies renouvelables peuvent être légitimées par d'autres considérations que la seule lutte contre le changement climatique (notamment la sécurité énergétique et la lutte contre la pollution atmosphérique) que le prix du carbone ne suffira pas à internaliser.

1.5. Le cas particulier de l'efficacité énergétique

On observe dans tous les pays que les technologies d'efficacité énergétique se diffusent souvent lentement alors même qu'elles sont rentables. Selon l'AIE, éviter une tonne de CO₂ par des politiques d'efficacité énergétique permet d'économiser 65 \$ aux Etats Unis et 169 € en Europe. De nombreuses technologies de maîtrise de la demande d'énergie dans le domaine du bâtiment sont déjà mûres, et ne sont pourtant pas utilisées de façon généralisée (ampoules et équipement basse consommation, matériaux isolants...). Il existe en fait de nombreuses imperfections du marché dans le domaine de l'efficacité énergétique :

- La première imperfection est l'information imparfaite des consommateurs : ceux-ci ne savent pas que certains équipements sont rentables¹¹. C'est pour remédier à cette imperfection que de nombreux pays ont mis en place des systèmes d'étiquetage des appareils électroménagers ;
- Deuxièmement, pour certains équipements, l'efficacité énergétique n'est pas le critère principal de choix : les consommateurs s'attachent en priorité à d'autres caractéristiques techniques comme la taille, la couleur ou le prix. Il est alors utile de mettre en place des seuils minimums de performance énergétique (directive éco-conception en préparation) ou de négocier avec les constructeurs des accords volontaires d'efficacité énergétique (comme l'accord volontaire avec les constructeurs européens sur les voitures) ;
- Le troisième niveau d'imperfection est celui des interactions locataire/ propriétaire : il n'est pas dans l'intérêt du propriétaire d'acheter des technologies plus chères qui permettront au locataire de réduire sa facture énergétique. En effet, le locataire a une information imparfaite et il ne va pas nécessairement valoriser l'investissement du propriétaire. C'est pourquoi le plan climat français prévoit la généralisation de l'étiquette énergie dans les bâtiments. C'est aussi la raison pour laquelle il est légitime de mettre en place des réglementations sur la performance énergétique des bâtiments ;
- Un quatrième niveau d'imperfection est celui de l'accès au marché des capitaux pour les ménages et les petites entreprises : si pour pouvoir mettre en place des technologies plus vertes, moins chères sur le long terme, il est nécessaire d'emprunter, les ménages ne pourront ou voudront pas nécessairement avoir recours à des emprunts. Comme on observe en plus que le secteur résidentiel n'est pas très sensible aux changements de prix de l'énergie et qu'il est plus sensible à un changement de prix du matériel lors de son installation, le plan climat français a prévu la mise en place un crédit d'impôt allant jusqu'à 40 % pour les particuliers qui installent des technologies propres dans leurs résidences.

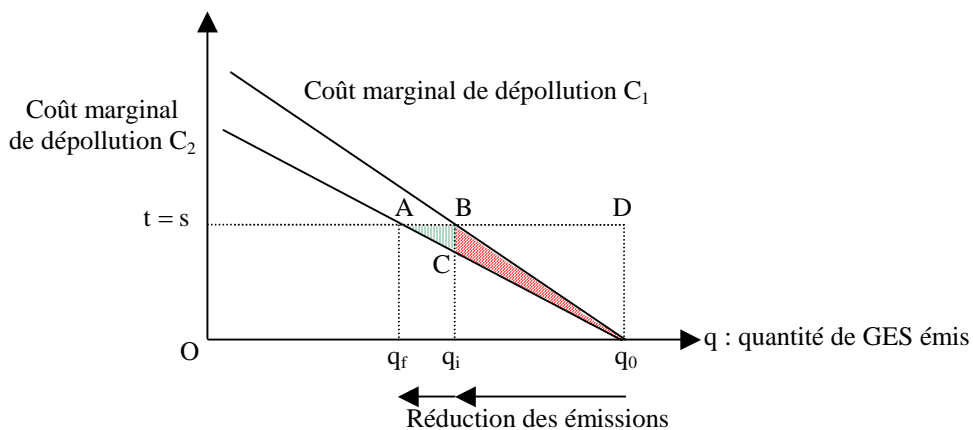
Ces différentes imperfections du marché justifient donc la mise en place de politiques plus spécifiques, dans le domaine de l'efficacité énergétique, en plus du simple signal prix du marché de permis portant sur le secteur de l'électricité.

¹¹ Par exemple, les vitrages peu émissifs présentent un surcoût très faible par rapport aux doubles vitrages classiques, de l'ordre de 10€ par m², amorti en moins de deux ans. Pourtant, ils sont inconnus de la majorité des vendeurs de fenêtres et donc mal diffusés en France.

1.6. Les politiques axées sur la demande encouragent l'innovation

Les politiques axées sur la demande encouragent l'innovation sur le long terme. En général, les économistes considèrent que les instruments économiques (marchés de permis et taxes) sont plus efficaces pour encourager la recherche que les normes car ils créent une incitation permanente à effectuer de la recherche (efficacité dynamique).

On suppose qu'une norme impose à une firme de se placer au niveau d'émission q_i . Avant l'innovation, l'entreprise réduit ses émissions d'une quantité $q_0 - q_i$ et le coût technique de



dépollution est alors égal à la surface du triangle Bq_iq_0 . Après l'innovation, l'entreprise dépollue toujours au même niveau, mais son coût est alors Cq_iq_0 . Le gain à l'innovation est donc égal à la surface du triangle BCq_0 .

Dans le cas d'une taxe au taux s , l'entreprise dépollue après innovation $q_0 - q_f$. Le coût technique de dépollution est alors égal à la surface Aq_fq_0 . Le gain à l'innovation est donc :

$$\underbrace{Bq_iq_0 - Cq_iq_0}_{\text{Gain lié à la baisse du coût technique pour dépolluer } q_i} - \underbrace{ACq_iq_f}_{\text{Perte liée au fait que l'on dépollue plus}} + \underbrace{ABq_iq_f}_{\text{Gain lié à la baisse du montant de taxe acquitté}} = BCq_0 - ACq_iq_f + ABq_iq_f = ABq_0$$

L'incitation à l'innovation dans le cas d'une taxe est donc supérieure à celle générée par une norme (la différence étant représentée par le triangle ABC).

Se basant sur les expériences passées, les entreprises savent que les normes émises à un moment donné ont de fortes chances d'être durcies au cours du temps. Cette expérience historique du durcissement des normes fournit alors une incitation à l'innovation. Néanmoins, l'avantage de la taxe sur l'innovation en terme statique demeure en dynamique car la taxe augmente aussi avec le temps.

En ce qui concerne l'aspect dynamique, dans le cas particulier du changement climatique, il est difficile pour les agents privés d'anticiper l'évolution du signal prix carbone car les objectifs à long terme de réduction des émissions n'ont pas encore été fixés (pour des raisons politiques mais aussi parce que l'évaluation des dommages, nécessaire pour connaître ce signal prix de long terme, est un exercice très difficile.) Dans la mesure où les agents privés ont du mal à appréhender l'évolution future de la contrainte carbone, leur effort de R&D actuel n'est probablement pas optimal.

2. Les politiques axées sur l'offre

2.1. Les politiques publiques existantes pour encourager l'innovation

Plusieurs formes d'intervention publique participent à l'accroissement du stock de connaissances et à l'innovation et la R&D pris dans un sens large : les investissements directs du secteur public dans la recherche scientifique, le financement des activités de recherche à l'université pour favoriser la formation de capital humain, les bourses aux étudiants...

L'Etat subventionne les dépenses de R&D privée soit par des subventions directes, éventuellement ciblées sur des secteurs particuliers ou par une défiscalisation, générique ou modulée¹² selon le type d'entreprise. En France, la R&D des entreprises privées est financée pour environ 15 % par des moyens d'origine publique. Les financements publics de la R&D des entreprises passent par¹³¹⁴ :

- les contrats militaires (1 500 m€) ;
- les contrats civils liés à l'exécution des grands programmes technologiques (575 m€ sur l'aéronautique, le spatial, le nucléaire, le secteur des micro et nanotechnologique) ;
- des financements d'agences : l'ANVAR alloue aux PME 80 m€ en subventions et 190 m€ en avances remboursables ;
- des aides sous forme de prêts (Banque des PME, Caisse des dépôts) ;
- le crédit d'impôt en faveur de la recherche (CIR)¹⁵ (520 m€ en 2001) ;
- les financements européens : la France a reçu 122 m€ dans le cadre du 5^{ème} PCRD ;
- le capital risque, qui s'est développé ces dernières années, offre un financement pour des opérations commerciales risquées. Les fonds communs de placement dans l'innovation (FCPI), créés en 1997, ont pour vocation d'investir 60 % de leurs fonds dans des entreprises européennes, innovantes, non cotées, employant moins de 500 salariés.

Les économistes se posent évidemment la question de savoir si ces aides sont efficaces. Le principal reproche qui est fait aux aides *ex ante*, du type subventions directes ou exonération fiscale, est qu'elles présentent **un risque d'effet d'aubaine : les entreprises font subventionner par l'Etat des projets qu'elles auraient de toute façon réalisés, ce qui annule l'effet de levier (Guellec 1999). L'autre reproche est que lorsque l'Etat choisit de subventionner de la R&D ciblée, il se substitue pour partie au marché dans la sélection des technologies.** Or, dans le rôle de choisir les vainqueurs, il n'est pas certain que l'Etat soit toujours plus efficace que le marché. De plus, les financements affectés ne permettent pas de comparer la rentabilité des différents investissements. C'est pourquoi l'Etat utilise une palette d'instruments mêlant instruments généraux et instruments ciblés type fonds pour des réseaux de recherche technologique).

¹² Les aides fiscales permettent aux pouvoirs publics de financer une partie de la R&D menée dans les entreprises. Elles servent surtout pour stimuler les niveaux globaux de R&D des entreprises mais elles ne permettent pas en général aux pouvoirs publics d'orienter la R&D vers des secteurs à haute rentabilité sociale.

¹³ Les chiffres de ce paragraphe proviennent du rapport Beffa.

¹⁴ Environ 80 % des aides publiques vont à de grands groupes qui réalisent, il est vrai, l'essentiel des activités de R&D en France. Un peu plus de 10 % des aides publiques vont aux PME qui ne réalisent que 8 % de la recherche. (Betbèze, 2005).

¹⁵ Le CIR est égal à 50 % de l'excédent des dépenses de l'année par rapport à la moyenne de celles exposées au cours des deux années précédentes. Il est plafonné à 40 millions de francs par an et par entreprise.

Une évolution vers les grands programmes technologiques dans le rapport Beffa

Dans son rapport sur une nouvelle politique industrielle, Beffa (2005) propose que l'Etat mette en place des programmes technologiques industriels de long terme. Ces programmes, fondés sur un partenariat public/privé, seront menés au plus près du développement industriel et de manière complémentaire à l'effort public qui doit porter vers la recherche fondamentale. Ils porteront sur des produits qui nécessitent des innovations importantes et seraient destinés à durer cinq à dix ans. Les industriels s'engageront en assurant le financement de la moitié des coûts du programme, ce qui garantira que les produits créés pourront constituer un marché, satisfaire une demande significative et de surcroît être à terme compétitifs. Ces grands programmes ont vocation à être beaucoup plus focalisés et plus avants que les programmes cadre de recherche européen (PCRD) : ils couvriront à la fois la recherche et le développement jusqu'à un stade précompétitif. L'aide prendra la forme de subventions (dans la phase amont du programme) ou d'avances remboursables (pour les développements les plus proches d'une réalisation préconcurrentielle en aval). L'aide sera remboursable en cas de succès du programme, ce qui limitera le risque de l'industriel.

2.2. Comparaison du niveau de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie en Europe, aux Etats-Unis et au Japon

L'administration américaine privilégie très clairement à l'heure actuelle une approche par les politiques axées sur l'offre pour lutter contre le changement climatique. L'administration Bush a ainsi prévu de dépenser 3 milliards par an sur la R&D, le développement, la démonstration et le déploiement des technologies liées au changement climatique. En particulier, 1,7 milliards devraient être dédiés à la recherche sur l'hydrogène jusqu'à 2008. Le projet phare de l'administration Bush est la mise en place d'une centrale à charbon de démonstration qui n'émettra pas d'émission et qui permettra de produire de l'hydrogène (*Integrated sequestration and hydrogen resarch initiative*). Cette initiative devrait coûter près de 1 milliard de dollars ; elle sera développée en partenariat avec l'industrie. Le projet devrait débuter en 2005 et durer 10 ans.

Les industriels européens critiquent souvent l'Union européenne pour sa politique axée sur la demande et font valoir qu'une politique axée sur l'offre serait plus efficace. Est-ce vrai ? Le niveau de R&D en France et en Europe sur les nouvelles technologies de l'énergie est-il insuffisant ? Dans la mesure où il existe de nombreuses politiques pour encourager la recherche en général, des politiques plus ciblées sur le changement climatique sont-elles justifiées ?

En millions d'euros	Etats-Unis (2003)	Japon (2003)	France (2002)	5 ^{ème} PCRD ¹⁶	Pays européens (1999) ¹⁷
Nucléaire	565	2 500	580		833
<i>Nucléaire/PIB</i>	<i>0,05</i>	<i>0,51</i>	<i>0,43</i>		<i>0,10</i>
Fossiles	500	100	230	7 ¹⁸	98
<i>Dont charbon</i>	<i>300</i>				<i>19</i>
<i>Dont séquestration</i>	<i>60</i>				
Énergies renouvelables	250	230	50		236
<i>Energies renouvelables/PIB</i>	<i>0,024</i>	<i>0,047</i>	<i>0,037</i>		<i>0,029</i>
Efficacité énergétique	500	500	40		195
<i>Efficacité énergétique/PIB</i>	<i>0,048</i>	<i>0,102</i>	<i>0,029</i>		<i>0,023</i>
Hydrogène et pile à combustible	160	200	40	30 ¹⁹	89
<i>Hydrogène /PIB</i>	<i>0,015</i>	<i>0,041</i>	<i>0,029</i>		<i>0,014</i>
Total	1 975	3 530	940		1451
<i>Total/PIB</i>	<i>0,19</i>	<i>0,72</i>	<i>0,69</i>		<i>0,19</i>
Total hors nucléaire	1 410	1 030	350	200	618
<i>Total hors nucléaire/PIB²⁰</i>	<i>0,13</i>	<i>0,21</i>	<i>0,26</i>		<i>0,09</i>

Tableau 1 : Dépenses de R&D sur l'énergie (Source : rapport Chambolle)

Le tableau 1 permet de comparer les niveaux de financement en 2003. Il fait ressortir qu'en absolu, le niveau de financement européen est effectivement inférieur aux financements américain (1410 m€) et japonais (1030 m€). Même ramené au produit intérieur brut, le financement hors nucléaire européen apparaît faible : 0,09 contre 0,13 aux Etats Unis et 0,21 au Japon. Ramenés au PIB, les financements français et japonais sont largement supérieurs au financement américain.

Néanmoins, le diagnostic du rapport Chambolle sur les nouvelles technologies de l'énergie est que l'objectif de réduction des émissions d'un facteur 4 en France est un défi considérable pour tous les secteurs, particulièrement pour celui des transports et **que l'effort de recherche en France n'est pas encore à la mesure du problème** : la recherche française est focalisée sur les secteurs du nucléaire et des énergies fossiles et les niveaux de recherche sont insuffisants dans certains domaines.

¹⁶ Le 6^{ème} PCRD (2003-2008) prévoit d'allouer 890 m€ à la recherche sur les systèmes énergétiques durables et 769 m€ à la recherche sur les transports durables.

¹⁷ Les chiffres pour les pays européens proviennent de l'AIE en 1999 alors que les autres chiffres du tableau proviennent des estimations du rapport Chambolle 2003. Ils sont donnés pour avoir un ordre de grandeur de l'effort européen mais non pour effectuer une comparaison.

¹⁸ La séquestration géologique du CO₂ a fait l'objet de programmes de recherche et démonstration dans les programmes cadre successifs : (33 m€ dans le 5^{ème} PCRD, 37 m€ ont été mis par l'Union dans le 6^{ème} PCRD).

¹⁹ Dans le 5^{ème} PCRD, 150 m€ ont été consacrés à la recherche sur l'hydrogène et les piles à combustible. Dans le 6^{ème} PCRD, les moyens consacrés aux piles à combustible, à leurs applications et aux technologies de l'hydrogène seront fortement augmentés par rapport au programme précédent (environ 300 M€). L'Europe a aussi pris l'initiative de créer une plate-forme technologique en 2004 dans le domaine de l'hydrogène.

²⁰ Source OCDE : PIB en 2003 au prix et taux de change de 2000, en milliards de dollars, (hypothèse 1 euro = 1 dollar).

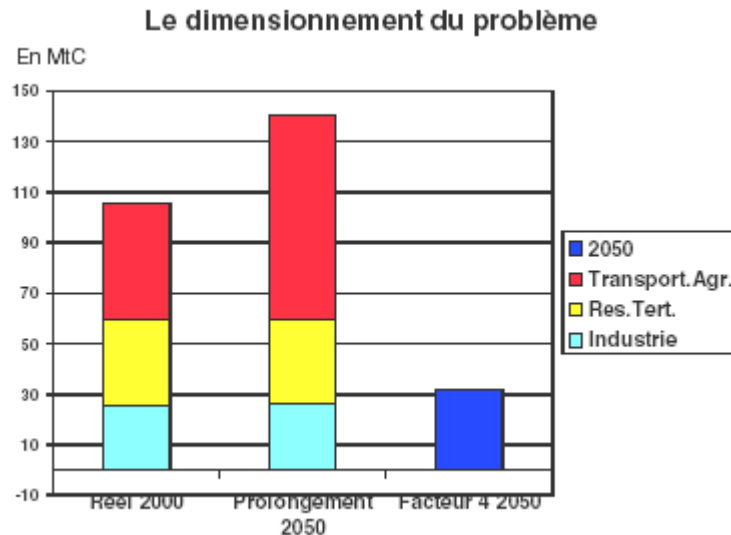


Figure 8: la division par 4 des émissions (source : Rapport Chambolle)

Selon Chambolle, le secteur des transports est bien pris en compte mais celui des bâtiments est moins bien traité. La pile à combustible, malgré l'existence du réseau PACO²¹, mobilise des montants de crédits publics minimes (10 M€) chaque année au regard des enjeux. Il en va de même pour l'hydrogène et surtout pour la filière séquestration du CO₂ (capture, transport et stockage du CO₂), prise en compte pour des montants encore très modestes. L'effort sur les énergies renouvelables est très faible (50 m€, soit moins de 5 % de l'effort européen). De plus, le rapport constate que les initiatives de l'Union européenne et des Etats membres manquent de cohérence et d'efficacité.

2.3. Les propositions du rapport Chambolle et l'agence de l'innovation industrielle

Le rapport Chambolle propose que l'Europe affirme son leadership pour la conduite des recherches sur la fusion, l'hydrogène et la pile à combustibles, la séquestration et, d'une manière appropriée, les grands réseaux électriques.

Les propositions du rapport Chambolle ont été synthétisées reprises par un groupe de travail interministériel qui a décidé de mettre en avant les propositions suivantes :

- Lancement d'un nouveau programme de R&D « Hydrogène et pile à combustible », s'appuyant sur les acquis et les pratiques du réseau de recherche et d'innovation « piles à combustibles » co-animé par l'ADEME et le CEA et rassemblant l'ensemble des industriels et des équipes de recherche impliqués (subvention publique d'environ 40 M€/an au lieu de 10 M€/an actuellement) ;

²¹ Les réseaux de recherche et d'innovation technologique du ministère de la Recherche, créés en 1998, ont pour but de favoriser le couplage entre la recherche publique et la recherche privée, sur des domaines jugés prioritaires où l'effort conduit par les structures habituelles est jugé insuffisant. Deux d'entre eux concernent plus particulièrement le domaine de l'énergie, le Prédit et le Paco. Le réseau Paco est un réseau technologique de R & D coopérative sur les piles à combustibles et leur filière amont (carburant) et aval (usages électricité/chaleur). L'animation scientifique et technique est assurée conjointement par l'Adème et le CEA. Le financement des projets labellisés est assuré par le ministère de la Recherche (via le FRT), le ministère chargé de l'industrie, l'Adème, occasionnellement l'ANVAR et le ministère chargé des transports. Sur 1999 / 2002, les financements publics mobilisés se sont élevés à 32 M€. Une partie des projets est conjointe avec le Prédit.

- Maîtrise de la chaîne du CO₂ : de la combustion des ressources possibles à la capture du CO₂ et à son stockage. Un des objectifs principaux du programme pourrait être la réalisation d'une installation de démonstration sur le territoire français (subvention publique de 15 M€/an au lieu de 2M€ actuellement). L'ensemble des acteurs intéressés sont d'ores et déjà rassemblés au sein d'un « club CO₂ » animé par l'ADEME en liaison avec le réseau technologique pétrole et gaz ;
- Mise en place d'un programme de recherches coordonnées sur l'énergie solaire photovoltaïque, permettant d'amplifier significativement la R&D conduite par l'ADEME avec ses partenaires (subvention publique d'environ 10 M€/an au lieu de 3M€/an actuellement) ;
- Dans le domaine des transports, le rapport juge l'organisation du PREDIT²² satisfaisante.
- Dans le bâtiment, une plate-forme similaire au PREDIT va être mise en place pour permettre des synergies entre les nombreux acteurs impliqués : le PREBAT (subvention publique d'environ 10 M€/an au lieu de 2,5 M€ actuellement). Une fondation bâtiment énergie positive regroupera les industriels (Arcelor, Lafarge, Gaz de France et EDF) , elle bénéficie déjà de montants entre 8 à 10 millions d'euros.
- Développement du potentiel de la biomasse, notamment en ce qui concerne les usages dans le secteur des transports (subvention publique d'environ 15 M€/an au lieu de 3 M€ actuellement) .

Le rapport Chambolle proposait aussi d'augmenter l'effort dans l'industrie en particulier sur quelques grands secteurs fortement émetteurs de gaz à effet de serre comme le ciment, la sidérurgie, qui ont maintenant à développer de véritables ruptures technologiques. Cette proposition n'a pas été reprise. Néanmoins, les industriels de l'acier se sont déjà organisés au niveau européen (voir encadré).

Initiatives des industriels : ULCOS

Un consortium de 48 entreprises et organisations européennes, coordonné par Arcelor, a signé, début 2005, un accord pour lancer une initiative conjointe de Recherche et Développement visant à trouver de nouveaux processus de production d'acier réduisant drastiquement les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre du secteur. Le consortium s'appelle ULCOS, "*Ultra Low CO₂ Steelmaking*". L'initiative commencera par une phase exploratoire de cinq ans, qui devrait être suivie par une phase pilote de même durée, avant qu'une première mise en oeuvre commerciale ne puisse être envisagée. Le consortium a répondu à un appel spécifique de la Commission européenne dans le 6^{ème} PCRD (20 m€ de la Commission) dans le domaine des "Processus sidérurgiques à très basses émissions de CO₂", en coordination avec les appels 2003 et 2004 du Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier (FRCA).

Le rapport Beffa sur l'innovation a retenu des thèmes très proches de ceux mis en avant par Chambolle : pile à combustible et filière hydrogène, solaire photovoltaïque, biocarburants, voiture économe et propre, capture et séquestration du CO₂.

Les rapports Chambolle et Beffa font ressortir que l'Etat a une légitimité pour intervenir plus particulièrement sur les recherches liées au sujet du changement climatique à deux titres :

²² Le réseau PREDIT constitue la plate-forme de coopération et d'action pour la recherche et le développement dans le domaine des transports terrestres au niveau national. Le financement total du réseau Prédit 2 a représenté un investissement total de 747 M€ de 1996 à 2000, dont 260 M€ pour le public et 487 M€ pour le privé. Pour le Prédit 3 (2002-2006), lancé le 19 mars 2002, les crédits incitatifs sont de l'ordre de 305 M€.

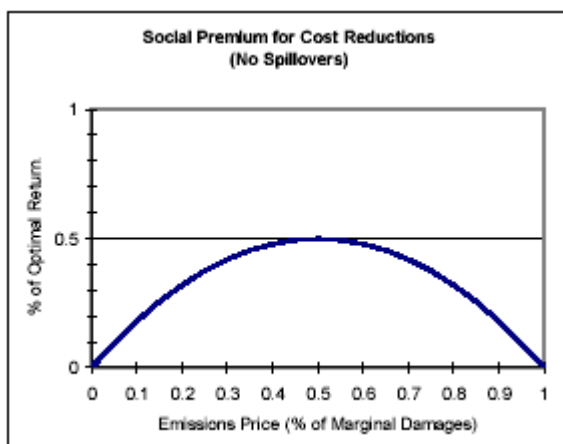
- Des grands programmes doivent être mis en place **dans les domaines où les inventions sont encore éloignées du stade de la commercialisation et de la diffusion massive**. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de la partie II.1 : les instruments économiques sont très efficaces pour accélérer l'apprentissage par la pratique mais ils n'encouragent la R&D à moyen/long terme qu'à condition que le prix du carbone soit à un niveau optimal et parfaitement connu dans le temps, ce qui n'est pas le cas actuellement. C'est pourquoi il est utile aujourd'hui que l'Etat intervienne pour développer les technologies de plus long terme. L'action de l'Etat permettra de diminuer le coût de ces technologies et de les rapprocher du stade de la commercialisation. Elles pourront ensuite adoptées dès que le prix du carbone les rendra rentables ;
- L'Etat a aussi un rôle à jouer en terme de coordination de l'effort de recherche, en particulier dans le domaine du bâtiment et de la biomasse.

3. Complémentarité des deux voies

C. Fischer (2004) examine dans un modèle simple dans quelle mesure un financement public de la R&D est justifié en fonction du prix du carbone (le prix du carbone est compris entre zéro et le prix optimal pour la société). Elle s'intéresse particulièrement aux situations où le prix n'est pas à un niveau optimal. Elle examine trois cas :

- un cas où l'inventeur est capable de s'appropriier tous les bénéfices pour la société de son invention (*no spillover*). Ce cas correspondrait à une situation où un inventeur se verrait accorder un brevet très large sur son invention qui couvrirait à la fois son invention présente et toutes les inventions qui en découleront ;
- un cas où l'inventeur ne récupère aucun des bénéfices pour la société que génère son invention (*full spillover*). Ce cas correspond à une situation où l'inventeur ne peut pas breveter son invention et ne peut pas avoir recours au secret professionnel pour la protéger ;
- un cas où l'inventeur est capable de s'appropriier environ la moitié des bénéfices que son invention génère pour la société. (Le chiffre de 50 % a été choisi arbitrairement par C. Fischer) Ce cas représente assez bien le système des brevets actuels où les inventeurs récupèrent seulement une partie des bénéfices générés par leurs inventions à la société.

C. Fischer définit la « prime sociale » comme le retour d'une invention pour la société additionnel au retour privé.

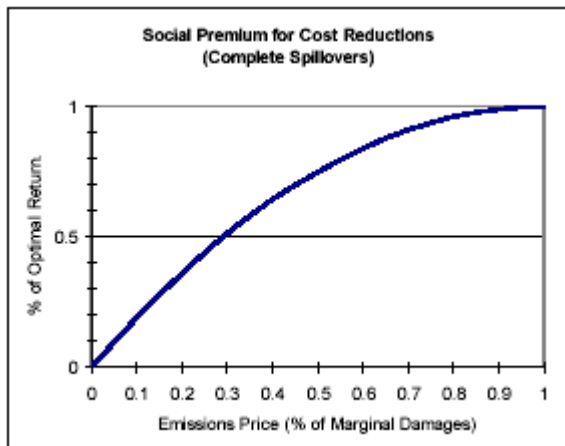


Dans le premier cas (*no spillover*), l'inventeur est capable de s'approprier tous les bénéfices de son invention.

Lorsque le prix du carbone est nul, la prime sociale est nulle : il n'y a aucune incitation à innover puisque les innovations sur les technologies propres ne sont pas utilisées.

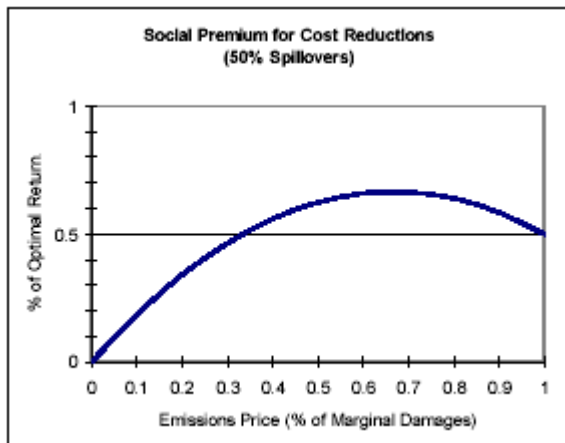
Lorsque le prix du carbone est à son niveau optimal (=1), les investisseurs privés ont une incitation à innover optimale (puisque'ils s'approprient tous les bénéfices de leurs inventions) ; la prime sociale est donc aussi nulle. Il n'est pas utile de subventionner la R&D par des fonds publics.

La prime sociale est la plus élevée lorsque le prix du carbone est égal à la moitié de niveau optimal. **C'est là que le financement public de la R&D est le plus justifié.**



Dans le deuxième cas (*full spillover*), l'inventeur ne récupère aucun des bénéfices que génère son invention : les investisseurs privés n'ont aucune incitation à innover.

La prime sociale ne cesse d'augmenter lorsque le prix du carbone augmente. **Il est alors toujours légitime de subventionner la R&D par des fonds publics. Le taux de retour du financement public de la R&D est d'autant plus élevé que le prix du carbone est élevé.**



Dans le troisième cas (*50 % spillover*), l'inventeur est capable de s'approprier environ la moitié des retours pour la société de son invention.

Lorsque le prix du carbone est faible, la prime sociale est faible. La subvention publique de la R&D a peu d'intérêt pour la société.

Les retours pour la société sont élevés lorsque le prix du carbone dépasse 30 % du prix du carbone optimal. La prime sociale est maximale lorsque le prix du carbone est égal à 70 % du prix optimal.

C. Fischer conclut donc qu'un fort financement public de la R&D est justifié quand les phénomènes de diffusion sont importants (un inventeur ne peut pas s'approprier tous les bénéfices de son invention) et que le prix du carbone a été fixé à un niveau supérieur à 30 % de son prix optimal.

L'approche européenne actuelle apparaît donc comme cohérente : la mise en place d'un prix du carbone est essentielle. Le prix des quotas sur le marché européen n'est probablement pas à un niveau optimal pour le moment : 10 €/tCO₂, alors que le coût social du carbone est estimé compris entre 14 à 20 €/tCO₂ (si la sensibilité du climat est faible) et 80 à 140 €/tCO₂²³ (si la sensibilité du climat est élevée). Il est donc légitime de subventionner la R&D au niveau européen. La subvention publique de la R&D est particulièrement justifiée dans les domaines où l'appropriation par les inventeurs des bénéfices de leur invention est faible, c'est à dire justement les domaines où les technologies sont encore loin du stade de la commercialisation (pile à combustible et filière hydrogène, capture et séquestration du carbone, photovoltaïque.)

²³ Selon l'analyse coût/bénéfice de la Commission européenne : *Winning the battle against global climate change* (2005) Document 6417/05.

III. COOPERATION INTERNATIONALE SUR LA R&D

1. Accord sur la recherche sur les technologies sobres en carbone

Le protocole de Kyoto fixe des objectifs de réduction aux pays développés, mais laisse toute liberté aux pays sur la façon d'atteindre ces objectifs. Les pays mettent en place les politiques publiques qu'ils jugent appropriées pour remplir leurs engagements. Le protocole de Kyoto ne prévoit pas d'objectif à long terme, ni de volet sur la recherche technologique.

La figure 6 montre que les gouvernements ont largement réduit leurs investissements dans les nouvelles technologies de l'énergie par rapport au niveau de 1980, après le deuxième choc pétrolier.

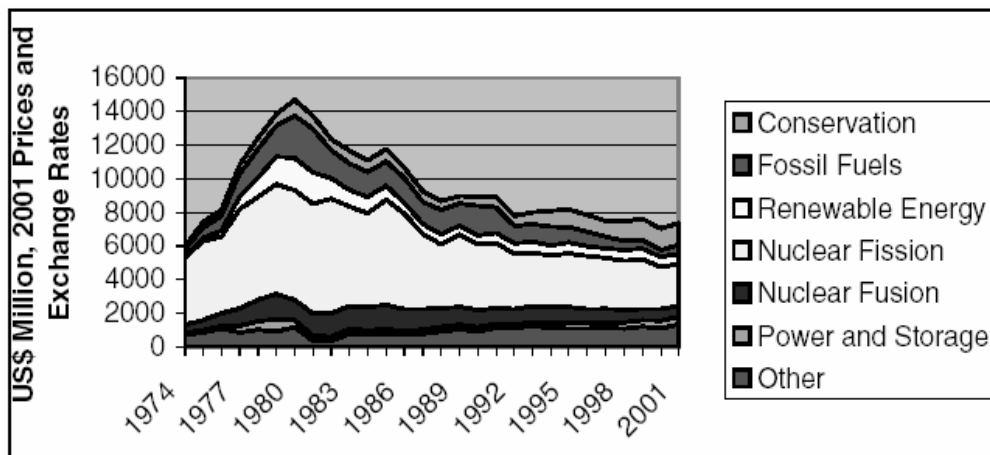


Figure 9 : Budgets de R&D des pays membres de l'AIE entre 1974-2001 (source : AIE)

Les gouvernements doivent intensifier aujourd'hui leurs efforts de recherche pour préparer les besoins en technologie en 2030, 2050 sans quoi la division par quatre des émissions des pays industrialisés sera impossible.

Dans la mesure où les technologies sobres en carbone ont des aspects de bien public, la recherche sur ces technologies pourrait donner lieu à une collaboration internationale. D'ailleurs, des accords de recherche existent déjà au niveau international dans certains domaines : l'exploration de l'espace, la recherche sur la fusion nucléaire (ITER), la coopération en agriculture. En général, les avantages reconnus de la collaboration sur la R&D entre les entreprises sont les suivants :

- éviter la duplication des recherches ;
- exploiter les économies d'échelle ;
- capturer les effets de diffusion qui pourraient être perdus autrement ;
- accélérer la commercialisation des inventions ;
- créer une vision technologique commune.

La collaboration technologique au niveau international **pourrait permettre d'éviter de dupliquer les efforts de recherche et aussi d'augmenter le niveau de recherche des pays.** La collaboration peut prendre plusieurs formes : le premier niveau de collaboration envisageable est le partage d'information. Le deuxième niveau est celui du partage du travail entre pays d'une manière coordonnée de façon à éviter de dupliquer les coûts. Le troisième niveau de collaboration est la création d'un fonds commun qui finance ensuite des équipes de recherche (comme les PCRD au niveau européen).

La coopération dans le domaine de la R&D présente surtout un intérêt dans les premiers stades de développement d'une technologie quand les coûts de recherche sont extrêmement élevés et que les perspectives de commercialisation et de retour sur investissement sont très lointaines. Plus le développement des technologies se rapproche du stade de commercialisation, et plus les intérêts commerciaux deviennent importants et limitent les possibilités de collaboration. Un exemple dans ce domaine est celui des médicaments contre le SIDA : les pays ne sont pas dans des logiques de collaboration bien que le SIDA soit considéré comme un "mal public mondial" car les intérêts des compagnies pharmaceutiques dominent les débats et que la majorité des porteurs du virus vivent dans les pays en développement. Il est cependant intéressant de constater que dans le cas du SRAS où le danger et la rapidité de propagation étaient clairs pour les pays développés, une collaboration internationale s'est mise en place très rapidement pour décoder le code du virus dans un délai très court.

En ce qui concerne plus particulièrement le domaine de l'énergie, il est important de rappeler que **de nombreuses initiatives existent déjà**. L'AIE (agence internationale de l'énergie) a mis en place depuis plusieurs années des "*implementing agreements*" qui sont des accords contractuels sur les technologies entre au moins deux membres de l'AIE pour développer des programmes et des projets de recherche dans les technologies de l'énergie, et pour encourager le développement et le déploiement de ces technologies. Ces accords sont basés sur le partage des coûts, et/ou le partage des tâches. Il existe à l'heure d'aujourd'hui une quarantaine d'accords de ce type. 6 accords sont sur l'énergie fossile (charbon propre, capture et séquestration du carbone), 9 accords sont liés à l'énergie nucléaire, 8 sur les énergies renouvelables et la production et l'utilisation d'hydrogène. Enfin, 14 accords portent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les transports, l'industrie et les bâtiments. Les financements dans le cadre de ces accords se seraient montés à 120 à 150 millions \$ par an ces dernières années (source : AIE).

La France est membre des 13 accords suivants : pile à combustible²⁴, moteurs alternatifs²⁵, bioénergie²⁶, gestion de la demande en électricité en heure de pointe²⁷, amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments²⁸, échange d'information sur l'énergie²⁹, conversion en lit fluidisé³⁰, technologies de pompes à chaleur³¹, véhicules électriques hybrides³²,

²⁴Membres : Allemagne, Australie, Belgique, Canada, Danemark, Finlande, France, Italie, Japon, Corée, Pays Bas, Norvège, Suède, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis. www.ieafuelcell.com

²⁵Membres : Canada, Danemark, Espagne, Finlande, France, Italie, Japon, Suède, Royaume-Uni, Etats-Unis. www.iea-amf.vtt.fi/

²⁶Membres : Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Canada, Croatie, Danemark, Commission Européenne, Finlande, France, Irlande, Italie, Japon, Pays-Bas, Nouvelle Zélande, Norvège, Suède, Suisse, Royaume-Uni, Etats-Unis

²⁷Membres : Australie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Italie, Japon, Corée, Pays Bas, Norvège, Suède, Royaume Uni, Etats-Unis. dsm.iea.org

²⁸Membres : Allemagne, Australie, Belgique, Canada, République Tchèque, Danemark, Finlande, France, Grèce, Israël, Italie, Japon, Pays Bas, Nouvelle Zélande, Norvège, Pologne, Portugal, Suède, Suisse, Turquie, Royaume Uni, Etats-Unis. www.ecbcs.org/

²⁹Membres : Allemagne, Brésil, Canada, Danemark, Espagne, Finlande, France, Corée, Mexico, Pays Bas, Norvège, Suède, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis. <http://www.etde.org/>

³⁰Membres : Autriche, Canada, Espagne, Finlande, France, Grèce, Italie, Japon, Corée, Portugal, Suède, Royaume Uni www.iea.org/tech/fbc/

³¹ Allemagne, Autriche, Canada, Espagne, France, Japon, Pays Bas, Norvège, Suède, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis. www.heatpumpcentre.org

³²Membres : Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Italie, Japon, Corée, Pays Bas, Suède, Suisse, Etats-Unis www.ieahev.org

hydroélectricité³³, évaluation des technologies de réduction de gaz à effet de serre pour les combustibles³⁴, photovoltaïque³⁵, chauffage solaire³⁶, énergie solaire concentrée (CPS)³⁷.

Les grands pays en voie de développement comme la Chine, l'Inde ou le Brésil ne sont pas membres de ces accords bien que les pays qui ne sont pas membres de l'AIE puissent en faire partie. **Une piste pour renforcer la collaboration dans la recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie au niveau international pourrait être de renforcer ces accords de coopération de l'AIE et de les étendre plus largement aux grands pays en voie de développement.**

Les Etats-Unis ont lancé un certain nombre d'initiatives de haut niveau de collaboration technologique ces dernières années :

- *The forum génération IV* lancé en 2000 qui vise à développer la prochaine génération de réacteur nucléaire (plus sûre, moins chère et qui résiste à la prolifération) d'ici 2030³⁸ ;
- *The International Partnerships for a Hydrogen Economy (IPHE)*, lancé en avril 2003, qui vise à amorcer la transition mondiale à une économie de l'hydrogène avec l'objectif de rendre les piles à combustible rentables dans les véhicules dès 2020. Cet accord vise à avancer la recherche, le développement et le déploiement de l'hydrogène et des piles à combustible ainsi qu'à développer des standards et des codes communs pour l'utilisation de l'hydrogène³⁹ ;
- *The Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)* lancé en juin 2003 qui vise à développer les technologies pour les centrales à charbon sans pollution et sans gaz à effet de serre qui peuvent aussi produire de l'hydrogène⁴⁰ ;
- *The Methane-to-Markets Partnership* lancé en juillet 2004 qui travaille de près avec le secteur privé et qui se concentre particulièrement sur le méthane provenant des systèmes de gaz et de pétrole, des mines de charbon souterraines et des décharges (les Etats-Unis espèrent que le projet permettra de récupérer 50 MteCO₂ d'ici 2015, ils ont prévu de mettre 53 millions de dollars dans le projet en 5 ans)⁴¹.

³³Membres : Canada, Chine, Finlande, France, Italie, Japon, Norvège, Suède, Royaume Uni www.ieahydro.org

³⁴Membres : Australie, Canada, Danemark, Commission européenne, Finlande, France, Japon, Corée, Pays Bas, Nouvelle Zélande, Norvège, Suède, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis, Venezuela www.ieagreen.org.uk

³⁵Membres : Allemagne, Australie, Autriche, Canada, Danemark, Espagne, Commission européenne, Finlande, France, Israël, Italie, Japon, Corée, Mexico, Pays Bas, Norvège, Portugal, Suède, Suisse, Turquie, Royaume Uni, Etats-Unis. www.iea-pvps.org

³⁶Membres : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, Commission européenne, Finlande, France, Italie, Mexico, Pays Bas, New Zélande, Norvège, Portugal, Suède, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis www.iea-shc.org/

³⁷Membres : Allemagne, Algérie, Australie, Brésil, Espagne, Egypte, Commission européenne, France, Israël, Mexico, Russie, Afrique du Sud, Suisse, Royaume Uni, Etats-Unis www.solarpaces.org/

³⁸ Les membres du forum génération 4 sont l'Argentine, le Brésil, le Canada, la France, le Japon, la Corée, l'Afrique du Sud, la Suisse, le Royaume Uni et les Etats-Unis.

³⁹ Les membres de l'IPHE sont les Etats-Unis, l'Australie, le Canada, l'Union européenne, la France, l'Allemagne, le Royaume Uni, l'Italie, la Norvège, le Japon, la Corée, la Russie, l'Islande, le Brésil, la Chine, l'Inde. <http://www.iphe.net/>

⁴⁰ Les membres du CSLF sont les Etats-Unis, l'Australie, le Canada, l'Union européenne, la France, l'Allemagne, le Royaume Uni, l'Italie, la Norvège, le Japon, la Corée, la Russie, le Brésil, la Chine, l'Inde, le Mexique, la Colombie, l'Afrique du Sud. <http://www.cslforum.org/>

⁴¹ Les membres du *Methane to market* sont les Etats-Unis, l'Australie, le Royaume Uni, l'Italie, la Russie, l'Ukraine, le Japon, le Nigéria, le Brésil, la Chine, l'Inde, le Mexique, la Colombie, l'Argentine. <http://www.methanetomarkets.org/>

Enfin, un forum de collaboration qui vise à accélérer et étendre le marché pour les énergies renouvelables et les technologies d'efficacité énergétique, le « *Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP)* », a été lancé Johannesburg en 2002 par le gouvernement britannique.⁴²

Il est intéressant de noter que les 10 plus grands émetteurs de gaz à effet de serre (les Etats-Unis, la Chine, l'Union européenne, la Russie, l'Inde, le Japon, l'Allemagne, le Brésil, le Canada, le Royaume-Uni) sont membres de presque toutes les initiatives américaines (IEPS, CSLF, MtMP).

On peut donc conclure de cet examen qu'il existe déjà de nombreuses initiatives de collaboration internationale et qu'il est plutôt important à ce stade de chercher à les renforcer, en particulier en étendant la participation au plus grand nombre de pays, que d'en créer de nouvelles.

Proposition de Scott Barrett, limites

Scott Barrett (2001) propose de remplacer le protocole de Kyoto par un nouvel accord international sur la recherche sur la production d'électricité et le transport. Les Etats s'engageraient à des contributions financières différenciées en fonction de leur capacité et de leur volonté de payer pour la recherche. Le niveau de contribution de chaque pays serait fonction de la contribution totale des membres, de façon à avoir une incitation à la participation. Les résultats des recherches seraient partagés entre tous les membres. Barrett propose en complément une approche par les standards (voir paragraphe III 2).

La proposition de Barrett est critiquable à plusieurs titres. Premièrement, la négociation d'un tel accord dans le cadre de la convention climat pourrait être très long : il faudrait que les pays arrivent à s'accorder sur la recherche technologique à financer et les niveaux de financement. Ce temps perdu à négocier pourrait même être contreproductif si les efforts individuels de R&D des pays étaient ralentis pendant ce temps. Deuxièmement, le risque de myopie collective est relativement élevé : la collaboration internationale implique une réduction de la variété des voies de recherche suivies. Or, il est possible que les technologies sur lesquelles se concentrent les Etats s'avèrent finalement moins prometteuses que prévu alors que les technologies plus originales qui auraient pu donner des résultats intéressants auront été laissées de côté (dans le passé, les gouvernements se sont souvent lourdement trompés en mettant beaucoup d'argent sur des technologies qui ont échoué.) C'est pourquoi la proposition de Barrett n'apparaît pas vraiment comme une alternative crédible au système international actuel.

En conclusion, **l'approche actuelle avec des « clubs de pays » qui désirent collaborer sur un sujet technologique donné apparaît satisfaisante** : seuls les pays intéressés participent à ces initiatives et ils n'ont pas besoin d'obtenir un consensus au niveau international. Cette approche garantit aussi une certaine diversité des voies de recherche suivies. Néanmoins, il serait intéressant d'essayer d'amener les grands pays émergents à participer activement aux accords de l'AIE.

⁴² Les membres du REEEP sont l'Australie, les Etats-Unis, l'Allemagne, l'Autriche, l'Irlande, l'Italie, l'Espagne, les Pays Bas, le Royaume Uni, la Commission européenne, le Brésil, le Ghana, l'Indonésie, le Japon, les Philippines, le Sri Lanka, le Sénégal, l'Afrique du Sud.

2. Approche par les normes, les standards

Le volet complémentaire de la proposition de Barret sur la collaboration technologique est la mise en place en parallèle d'un accord sur des normes technologiques communes (surtout dans le domaine des transports : standards d'efficacité énergétique mondiaux pour les voitures). Barrett affirme que la mise en place de telles normes dans un certain nombre de grands pays pourrait avoir un effet d'entraînement sur les autres pays : lorsqu'un nombre suffisant de pays aura adopté une norme, les autres seront incités à les suivre pour pouvoir continuer à avoir accès à leur marché. Un exemple de ce phénomène est l'inquiétude des constructeurs américains face à la décision récente du gouvernement chinois d'adopter une réglementation contraignante sur l'efficacité énergétique des voitures.⁴³ L'accès au marché chinois, qui deviendra à terme le premier marché d'automobiles au monde⁴⁴, est un enjeu pour les constructeurs américains. Or, certaines de leurs voitures actuelles ne sont pas conformes aux standards chinois. La figure 10 ci-dessous montre clairement la disparité des standards actuels.

Figure ES

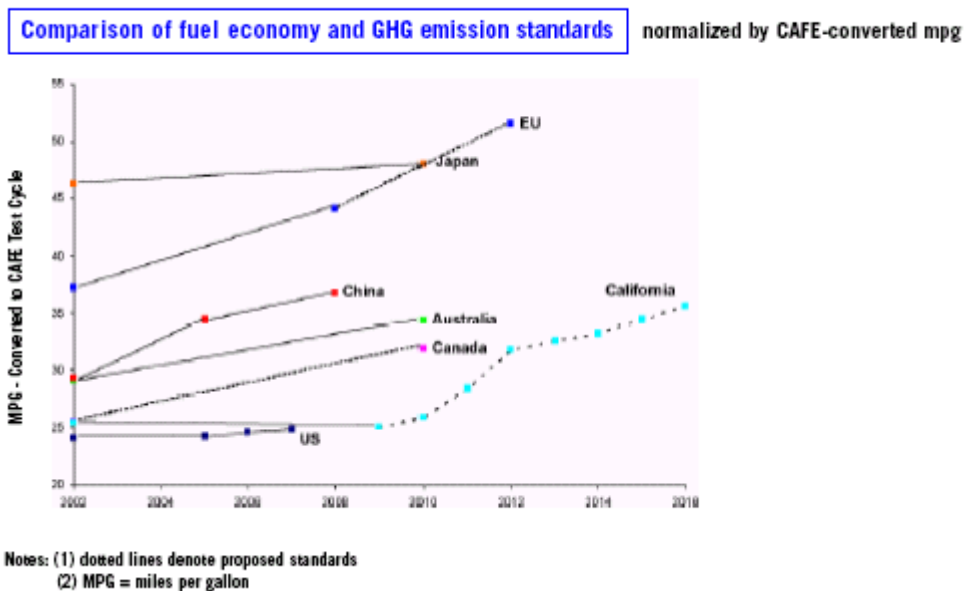


Figure 10 : Comparaison des standards d'efficacité énergétique dans différents pays (Source : Pew center)

Edmonds (1999) a pour sa part proposé que toutes les nouvelles centrales électriques qui s'installent dans les pays développés après 2020 aient l'obligation d'être pourvues d'équipements de capture et séquestration du carbone qu'elles émettent. Après une période de grâce, la même exigence pèserait sur les pays en voie de développement lorsque le revenu par tête serait égal à la moyenne de celui des pays développés en 2020 en parité de pouvoir d'achat. Cette proposition est critiquable car elle entraînerait des coûts beaucoup plus importants qu'une approche par les marchés de permis, le coût supplémentaire étant estimé à plus de 30 % par Edmonds.

⁴³ Le premier salon mondial de la voiture propre a eu lieu à Shanghai en 2004 et les universités chinoises développent des programmes de recherche ambitieux, notamment dans la perspectives des JO de Pékin en 2008.

⁴⁴ En 2003, 2 millions de voitures ont été vendues en Chine. (World energy Outlook 2004)

L'établissement de normes joue actuellement un rôle crucial dans un grand nombre de secteurs où les normes visent à garantir un certain niveau de qualité, de sécurité et de fonctionnalité du produit final (industrie aérospatiale, industrie automobile, le bâtiment, la transformation chimique, et le secteur de la santé). Le désavantage d'une approche par les normes est que les normes courent toujours le risque d'être soit trop lâches, soit infaisables en pratique car les régulateurs ne savent pas exactement quel montant est techniquement faisable (d'autant plus que les entreprises anticipent souvent que les autorités vont supprimer l'objectif s'il apparaît trop ambitieux ou trop cher).

La négociation de normes dans le cadre de la convention climat serait probablement un processus extrêmement long et difficile. La négociation serait très probablement influencée par les groupes de pression qui chercheraient à éviter des normes sur des technologies spécifiques. Un exemple du poids des groupes de pression est celui du lobbying actuel des constructeurs automobiles américains et internationaux contre la mise en place de normes sur les émissions de CO₂ des voitures en Californie. **Surtout, dans la mesure où les pays sont tous différents, une norme bien appropriée dans un pays donné ne pourra pas être transposée telle qu'elle dans un autre pays, pour des raisons géographiques ou culturelles.** En particulier, les pays en voie de développement risquent de s'opposer à de telles normes qui pourraient avoir pour conséquence d'avantager les compagnies des pays développés, en général plus performantes technologiquement. C'est pourquoi l'AIE, très favorable à une diffusion des bonnes pratiques en matière de normalisation, ne recommande pas de rechercher une trop forte harmonisation des normes au niveau international.

La piste de collaboration qui demeure intéressante est celle des standards. L'établissement en commun de standards technologiques est une forme de plus en plus répandue de coopération interentreprises. Le fait de s'entendre sur un standard technologique commun a notamment pour avantage d'assurer la compatibilité entre les différentes composantes qui permettent à un système de fonctionner et de dissiper les incertitudes concernant les caractéristiques clés d'un produit. L'établissement de standards en commun permet aux entreprises concernées d'être concurrentes à l'intérieur de marché sur le plan du prix et des caractéristiques des produits sans que se pose le problème de la compatibilité technologique de leurs produits.

Ainsi, selon Lafarge, la collaboration sur les standards pourrait avoir un intérêt dans le domaine du ciment. Le groupe analyse actuellement les possibilités de changer complètement la composition chimique du ciment pour trouver un ciment dont la fabrication engendrerait beaucoup moins d'émissions de gaz à effet de serre. Pour opérer une telle rupture technologique, il serait nécessaire de changer les codes de construction dans de nombreux pays. C'est pourquoi Lafarge ne pourrait effectuer un tel changement que de façon concertée avec les gouvernements et les autres industriels du ciment. La Chine, avec son marché du ciment et de la construction en forte expansion, présente un intérêt particulier puisqu'elle pourrait être le lieu idéal pour tester ces nouvelles innovations.

Une telle collaboration sur les standards pourrait être aussi utile dans le domaine de l'hydrogène qui est un domaine naissant et où les questions de sécurité vont de poser de façon cruciale.

IV. COMMENT ENCOURAGER LA DIFFUSION DE LA TECHNOLOGIE VERS LES PED?

1. La mesure du problème : croissance des émissions dans les PED

Selon les projections de l'AIE⁴⁵, la demande énergétique mondiale va augmenter de 60 % entre 2002 et 2030 et 2/3 de cette croissance sera le fait des pays en développement (PED). **Les émissions de CO₂ mondiales liés à l'utilisation de l'énergie devraient ainsi augmenter de 62 % entre 2002 et 2030 ; 1/4 de cette augmentation sera due à la Chine.** Le secteur de la production d'électricité dans les PED sera responsable de 38 % de cette augmentation, le secteur des transports dans les PED de 14 %. **La diffusion des technologies propres vers les PED dans les 30 prochaines années apparaît donc comme un enjeu majeur des politiques de lutte contre le changement climatique.**

L'AIE estime que les investissements dans le secteur de l'énergie dans le monde devront être de l'ordre de 16 000 milliards (en dollars 2000) entre 2003-2030, soit 568 milliards de dollars par an. En particulier, dans le secteur de la production d'électricité, l'AIE estime les besoins sur la période à 10 000 milliards de dollars. La Chine, à elle seule, devra investir 2 400 milliards de dollars (15%) entre 2003 et 2030 dans le secteur de l'énergie. Ces chiffres font ressortir l'existence d'une fenêtre d'opportunité : il est essentiel que ces investissements soient compatibles avec des scénarios de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre.

L'exemple de l'Inde sur l'éolien

L'utilisation de technologies propres est déjà une réalité dans les PED. L'Inde par exemple est déjà le 5^{ème} plus gros producteur au monde d'énergie éolienne : la puissance installée est passée de 30 MW en 1990, à 2 117 MW en 2002, avec pour objectif d'atteindre 3 000 MW en 2004. L'incitation à l'utilisation de cette énergie s'est fait notamment via un crédit d'impôt de 80 % sur les revenus de l'électricité renouvelable pendant les 10 prochaines années.

La Chine est plus en retard mais une loi sur les énergies renouvelables a été votée début mars 2005 (qui doit encore être discutée et avalisée par les députés). Cette loi encouragera le développement de l'électricité renouvelable produite à partir de la micro hydraulique, de l'éolien et du photovoltaïque par des tarifications spéciales et une obligation d'achat.

Une des premières pistes pour amener les pays en développement à verdir leur croissance énergétique est de supprimer les subventions dommageables en matière énergétique, notamment pour leur effet d'éviction sur des technologies plus sobres. C'est un point qui est crucial mais difficile à mettre en œuvre, pour des raisons à fois sociales et politiques. Etant donnée l'ampleur des réductions nécessaires dans ces pays, d'autres pistes pour infléchir les trajectoires d'émissions projetées pour les PED doivent être explorées.

En parallèle de son scénario tendanciel en 2030, l'AIE a développé un scénario alternatif en prenant en compte dans ses projections les politiques de réduction des émissions actuellement envisagées dans les pays de l'OCDE et les PED et **en supposant l'accélération de l'adoption des technologies propres dans les PED. Dans ce scénario, les émissions de CO₂ sont inférieures de 16 % aux émissions dans le scénario de référence en 2030 (-6 013 MteCO₂), ce qui est dû notamment à baisse de la demande en énergie primaire (-10 %). 67 % des gains en terme d'émissions dans le scénario alternatif comparé à la référence sont dus à des gains en efficacité énergétique et 17 % au développement des énergies**

⁴⁵ World energy Outlook 2004.

renouvelables. La Chine à elle seule assure 21 % des réductions d'émissions et l'Inde 7 %. Dans le scénario alternatif, les PED doivent investir 597 milliards supplémentaires dans la maîtrise de la demande en énergie et les transports, mais ils gagnent 900 milliards en investissement de production d'énergie évités. **Les PED gagnent donc à accélérer la diffusion des technologies propres, reste à identifier quels sont les obstacles à la diffusion de ces technologies.**

2. Les transferts de technologie

Les transferts de technologie entre pays existent toujours (transfert de l'idée d'agriculture au néolithique, ensuite utilisation du maïs et de la tomate en provenance du Mexique...). Les Nations-Unies définissent le transfert de technologie comme « *le transfert de connaissances nécessaires à la fabrication d'un produit, à l'application d'un procédé ou à la prestation d'un service ; cette définition ne s'étend pas aux transactions comportant la simple vente ou le simple louage de biens* ».

En général, l'objectif d'une entreprise qui transfère sa technologie est la conquête de marchés étrangers. Les technologies diffusent vers les pays en développement par trois grands canaux :

- par le commerce : un pays importe des produits intermédiaires de grande qualité, qu'il n'est pas capable de produire lui-même, pour les utiliser dans ses procédés de production. Cette option est avantageuse pour l'entreprise qui exporte sa technologie, elle l'est moins pour le pays qui la reçoit puisqu'il n'acquière pas la capacité de répliquer la technologie dans le futur ;
- par les licences ou l'enregistrement et l'utilisation de brevets étrangers. Ce type de transfert présente des risques pour l'entreprise qui cède sa technologie puisqu'elle prend le risque de se créer un concurrent dangereux et de perdre des marchés dans le futur ;
- à travers l'investissement : une entreprise installe une nouvelle branche dans un pays étranger pour exploiter la technologie elle-même. Les investissements directs étrangers sont les transferts les plus intéressants pour les PED car ils leur permettent de bénéficier de la connaissance de l'entreprise ainsi que de son expérience de management et de sa capacité entrepreneuriale grâce aux formations et l'apprentissage par la pratique. En revanche, du point de vue du pays émetteur, ce type de transfert peut impliquer un transfert au moins partiel de la production à l'étranger, d'où il peut résulter des pertes d'emploi.

Il existe en plus une multitude de canaux diffus comme l'émigration, les voyages et visites, les échanges d'étudiants, les journaux et conférences scientifiques internationales, Internet...

Le système des brevets est parfois critiqué parce qu'en protégeant les droits de propriété, il limite la diffusion des technologies vers les PED. Néanmoins, les industriels font valoir qu'ils hésitent à transférer leurs technologies dans les PED parce que leurs droits de propriété n'y sont pas suffisamment protégés. Ils craignent que les compagnies des PED s'accaparent leur technologie et gagnent ensuite un avantage sur les marchés des PED et même ensuite sur leurs propres marchés. On retrouve donc le débat évoqué dans la partie 1 entre incitation à l'innovation et incitation à la diffusion. Selon Jin et Lu (1999), les multinationales qui possèdent les technologies sur le charbon propre transfèrent en Chine en priorité de l'équipement et non de la technologie par peur précisément de ces effets d'éviction. Les seules technologies qui sont transférées sont les technologies anciennes qui ont déjà été remplacées par de nouvelles technologies dans les pays développés. De plus, les conditions imposées par les multinationales pour le transfert de technologie sont tellement difficiles à

remplir par les partenaires chinois que ces derniers préfèrent souvent avoir recours à des technologies locales.

Analyse des transferts de technologie en Chine sur le Charbon propre

Philibert et Podkanski (2005) trouvent que les résultats des projets bilatéraux de collaboration entre les pays de l'OCDE et la Chine sur le charbon propre sont mitigés : les installations de démonstration mises en place en Chine par les différents pays fonctionnent mais elles n'ont pas généré le mouvement d'entraînement escompté.

Ils mentionnent les différents obstacles au déploiement des technologies de charbon propre en Chine :

- Le prix de l'énergie en Chine est trop faible ce qui ne permet pas aux investisseurs de recouvrir leurs coûts. De plus, la taxe sur les émissions de SO₂ est trop faible pour rendre les installations de dépollution rentables ;
- Une des préoccupations majeures des gestionnaires de l'énergie en Chine aujourd'hui est le risque de coupures de courant : la demande augmente tellement rapidement que de telles coupures apparaissent comme inévitables. Cela amène les producteurs à privilégier des solutions de court terme : ils ne ferment pas les centrales très polluantes existantes et préfèrent construire des petites centrales basées sur les technologies locales qui peuvent être édifiées très rapidement. **C'est pourquoi Philibert et Podkanski font remarquer que la maîtrise de la demande en énergie est un élément essentiel d'une politique de charbon propre en Chine ;**
- En ce qui concerne les préoccupations européennes de « vols » de technologie, ils font remarquer que les Chinois ne sont pas nécessairement intéressés par les technologies européennes les plus avancées qui sont difficiles à faire fonctionner et qui nécessitent une main d'œuvre très qualifiée (cette remarque de Philibert et Podkanski est cependant à nuancer car les Chinois sont très intéressés par les techniques de liquéfaction du charbon). En fait, l'absence de droits de propriété pose surtout problème aux compagnies domestiques : si une compagnie chinoise achète la licence d'une technologie étrangère, elle court le risque de voir d'autres entreprises chinoises qui n'ont pas acheté cette licence dupliquer la technologie.

3. Les transferts de technologie dans le cadre de la convention cadre sur les changements climatiques

3.1. Les initiatives de la convention cadre sur les changements climatiques

L'article 4.5 de la Convention cadre sur les changements climatiques demande que « *les pays développés parties et les autres parties développées figurant à l'annexe 2 prennent toutes les mesures possibles en vue d'encourager, de faciliter et de financer, selon les besoins, le transfert ou l'accès de technologies et de savoir faire écologiquement rationnels aux autres parties et plus particulièrement à celles d'entre elles qui sont des pays en développement, afin de leur permettre d'appliquer les dispositions de la convention. Dans ce processus, les pays développés parties soutiennent le développement et le renforcement des capacités et technologies propres aux pays en voie développement parties.* »

Pour ce faire, la Convention a créé un groupe d'expert sur les transferts de technologie dont le rôle est :

- d'évaluer les besoins en technologie ;
- de diffuser l'information sur les technologies ;
- de mettre en place un environnement qui facilite les transferts de technologie ;
- de renforcer les capacités des pays.

Ce groupe de travail a notamment mis en place un site web (TT : clear⁴⁶) qui fournit de l'information sur les transferts de technologies.

Tous les pays en voie de développement « *sont encouragés à entreprendre des **évaluations de leurs besoins spécifiques en matière de technologie**, sous réserve que les pays développés parties et les autres Parties développées visés à l'annexe II fournissent les ressources voulues compte tenu des conditions qui leur sont propres. Les évaluations des besoins technologiques ont pour objet d'aider à déterminer et à analyser les priorités en matière de technologie pour pouvoir constituer un portefeuille de projets et de programmes propres à faciliter le transfert de technologies et de savoir-faire écologiquement rationnels et l'accès à ces technologies et savoir-faire.* » (décision 4/CP.7).

Le Ghana a déjà établi son analyse de besoins technologiques. Dans ce cadre, il a hiérarchisé ses priorités dans le domaine de l'énergie, en prenant en compte les caractéristiques propres du pays, les impacts sur l'emploi, la création de richesse :

- développement des biocarburants (ce qui permettrait de réduire la dépendance énergétique et de développer des ressources locales);
- utilisation généralisée des ampoules à basse consommation (Le Ghana a mis en place un programme de subvention de ces ampoules pour leur assurer une très grande diffusion. Cela devrait permettre au pays d'économiser 350 MWh/an, réduisant ainsi le risque d'une crise de la production d'électricité. L'électricité économisée permet de plus que compenser le coût de la subvention initiale) ;
- développement du photovoltaïque, notamment pour l'électrification rurale ;
- Utilisation de centrales combinées au gaz et du micro hydraulique ;
- technologie de management et d'amélioration de l'efficacité dans le secteur des transports ;
- énergie éolienne (il manque encore des données à l'échelle du pays pour évaluer le potentiel de cette énergie).

Pour les déchets, les priorités ont été hiérarchisées de la façon suivante :

- Utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité ;
- Capture du gaz des décharges ;
- Biogaz ;
- Incinération des déchets.

Enfin, les accords de Marrakech ont créé un fonds spécial pour les changements climatique, abondé par les contributions volontaires des parties. Ce fonds doit assister les pays en voie de développement sur l'adaptation, les transferts de technologies, l'énergie, les transports, l'industrie, l'agriculture, la forêt, la gestion des déchets et la diversification économique. Il est peu probable que ce fonds soit jamais suffisant pour couvrir les besoins de financements des pays en voie de développement dans ces nombreux domaines.

⁴⁶ <http://ttclear.unfccc.int/ttclear/jsp/>

La *Climate technology initiative*⁴⁷ est une initiative lancée par l'UNFCCC et 23 pays de l'OCDE en 1995 dont l'objectif est d'accélérer le développement, l'application et la diffusion des nouvelles technologies. Cette initiative a été financée en grande partie par le Japon 46 % et les Etats Unis 31 %, elle s'est transformée en *implementing agreement* de l'AIE en 2003

3.2. Le fonds pour l'environnement mondial

Le Fonds pour l'environnement Mondial (FEM) est le mécanisme financier de la convention. Ses financements reposent sur le principe du « coût incrémental » : ils sont affectés aux surcoûts correspondant à la prise en compte des préoccupations environnementales dans un projet. Depuis sa création, il a investi 1,63 milliards de dollars sur des projets liés au changement climatique et a permis de cofinancer plus de 5 milliards d'investissements. La moitié des projets financés par les FEM étaient des projets d'énergies renouvelable et le ¼ des projets d'efficacité énergétique. Le programme 7 du FEM est le plus important en terme de transfert de technologie : son objectif est de réduire les coûts des technologies de réduction des émissions dans les pays en voie de développement par l'apprentissage par la pratique.

La figure 10 représente la répartition des réductions d'émissions des 104 projets du FEM en cours, de taille moyenne à grande. **Ces projets devraient permettre de réduire les émissions de 1 700 MteCO₂ (soit environ trois fois les émissions annuelles françaises) sur les 10 à 30 prochaines années.**

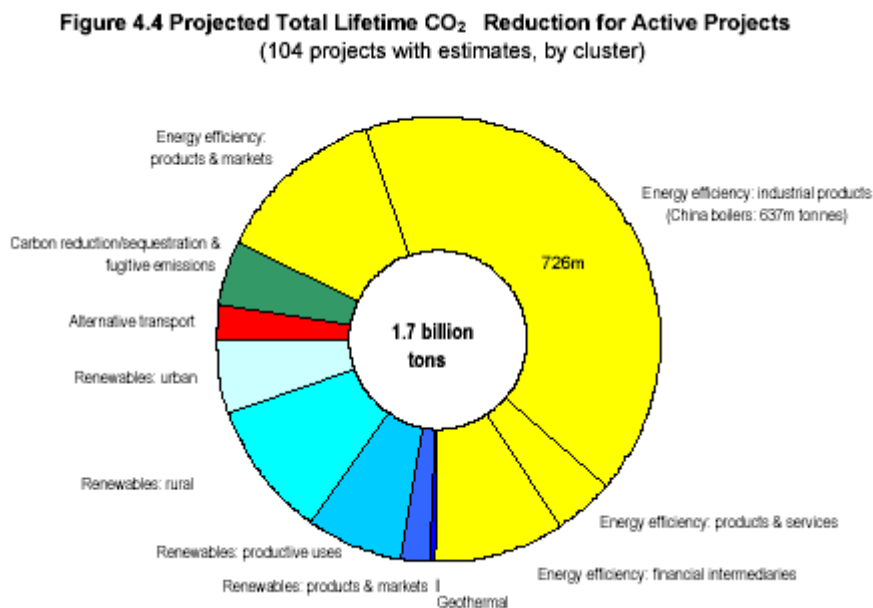


Figure 11 : Réduction des émissions de COE des projets FEM en cours, Source : GEF (2004)

Le coût moyen de réduction des émissions des projets financés par le FEM est compris entre 0,21 et 0,90 US\$ par tonne de CO₂, soit **0,35 US\$ par tonne de CO₂ en moyenne**. Ce prix est beaucoup plus faible que le prix de la tonne de CO₂ sur le marché européen (10 €/tCO₂) ou que le prix d'achat des crédits MDP (5 €/tCO₂).

⁴⁷ Membres : Autriche, Canada, Danemark, Allemagne, Japon, Norvège, Royaume Uni, Etats Unis

Table 4.1 Greenhouse Gas and GEF Incremental Cost by Cluster

Clusters	Total CO ₂ million tons	GEF US\$ million	GEF US\$ per ton CO ₂	GEF US\$ per ton carbon
Alternative transport	45	40.59	0.90	3.30
Carbon reduction	80	46.45	0.58	2.12
Energy efficiency	1180	247.84	0.21	0.77
Geothermal	9	6.38	0.69	2.53
Renewable energy	422	264.03	0.63	2.29
TOTAL	1736	605.28	0.35	1.28

Tableau 2 : Coût de réduction des émissions des projets financés par le FEM

Un seul projet FEM totalise 1/3 des réductions d'émissions (637 MteCO₂): ce projet porte sur l'amélioration des chaudières à charbon existantes et l'adoption de modèles plus efficaces en Chine. C'est un projet de 100 millions de dollars (financé pour 1/3 par le FEM). Le coût de réduction des émissions est estimé à 0,03 US\$ par tonne de CO₂. Une des clés du succès de ce projet est que le FEM n'a pas seulement acheté des chaudières plus efficaces aux pays développés mais qu'il a aussi transféré le savoir, les droits de propriété et les outils pour les fabriquer aux industriels chinois. Ce transfert a été possible car le risque de vente en retour de ces chaudières dans les pays industrialisés par les Chinois était très faible.

3.3. Le mécanisme de développement propre

Le mécanisme de développement propre (MDP) instauré par le protocole de Kyoto vise à encourager les investissements privés dans des projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les pays en voie de développement. En contrepartie d'un investissement propre, un industriel va pouvoir gagner un certain nombre de crédits carbone, pour un montant égal à la différence entre les émissions une fois le projet mis en place et un scénario de référence défini *ex ante* et validé par un comité appelé le Conseil exécutif du MDP. Ce mécanisme permet aux pays développés d'avoir accès aux réductions à bas coûts des PED et aux PED de bénéficier d'investissements propres. Il vise à encourager les transferts de technologie et à verdir les investissements directs à l'étranger.

Le mécanisme de développement propre a de nombreuses qualités :

- Il permet d'accéder en priorité aux réductions les moins chères. Les développeurs de projets s'attirent actuellement un certain nombre de critiques car ils développent des projets de destruction du HCF23 et du N₂O qui génèrent des montants de crédits très élevés et coûtent très peu cher. Néanmoins, c'est une des qualités du MDP : le secteur privé a justement le don de trouver les opportunités de réduction les plus intéressantes économiquement. Cela permet ainsi de révéler de l'information aux gouvernements.
- Il est flexible et inventif : plus de 303 projets MDP sont actuellement en cours de développement et ils pourraient générer plus de 352 millions de crédits avant 2012. Certains projets sont très originaux : la ville de Santiago au Chili vient de présenter un projet MDP de modernisation de son système de transport. Le Ghana présente un projet MDP de mise en place d'un standard minimum d'efficacité énergétique pour les climatiseurs.

En terme de réduction des émissions, le MDP est a priori un jeu à somme nulle puisque les réductions d'émissions obtenues à l'aide de projets MDP sont compensées par les émissions additionnelles ainsi autorisées dans les pays de l'Annexe I acheteurs de réductions. Certains reprochent même au MDP de réduire l'effort d'innovation technologique dans les pays développés puisqu'il tend à faire baisser le prix du carbone.

Cependant, selon le scénario de référence qui est choisi, le MDP peut avoir un impact sur l'innovation en dynamique. La décision 17/CP.17 des accords de Marrakech prévoit en effet une comptabilisation « [soit] pour une durée maximale de 7 ans susceptible de deux prolongations au plus, sous réserve que pour chacune d'entre elles, l'entité opérationnelle désignée établit que le niveau de référence initial du projet reste valable ou a été actualisé compte tenu de nouvelles données le cas échéant, soit pour une période maximum de 10 ans non susceptible de prolongation. »

Or, dès la seconde période, la nouvelle référence aura évolué du fait des transferts de technologie résultant des projets MDP de la première période. Si l'on imagine une référence de type sectorielle calée sur la moyenne du parc installé, celle-ci sera abaissée en seconde période par l'introduction des installations « propres » réalisées grâce au MDP en seconde période. En conséquence, le montant de crédits générés par une nouvelle installation en seconde période devrait être moindre qu'en première période. **La non permanence du scénario de référence peut insuffler au MDP une incitation à l'innovation propre** (Mathys 2004).

Un des principaux reproches actuellement adressé au MDP est que dans les secteurs où le coût marginal de réduction des émissions est beaucoup plus faible que le prix du carbone sur le marché international (exemple des projets HCFC22)⁴⁸, le MDP génère une rente. Cette rente représente une subvention sur les coûts de production des installations, et constitue une incitation à l'augmentation de la production et donc des émissions de gaz à effet de serre dans les PED (effets de fuite).

D'une manière générale, le défaut du MDP est qu'il n'amène pas les industriels à refléter le coût d'opportunité du CO₂ dans leurs produits. Or, comme expliqué dans la partie 2, un signal prix est essentiel pour canaliser le progrès technique vers les technologies propres et pour limiter l'effet rebond. Les experts commencent donc à réfléchir à des évolutions possibles du MDP (type objectif sectoriel), surtout dans les secteurs intensifs en énergie fortement soumis à la concurrence internationale (acier, aluminium, fer, éventuellement ciment et papier).

Enfin, le MDP pose aux gouvernements des pays développés une question de fond, à savoir comment éviter les comportements de passagers clandestins. Les pays développés ne veulent/peuvent pas financer tous les investissements dans les technologies propres dans les PED car certains investissements auront lieu de toute façon. Ellis et Bosi (2005) font un calcul simple : si tous les projets renouvelables et les projets nucléaires prévus par l'AIE en 2030 dans son scénario alternatif étaient éligibles au MDP, ils pourraient générer 0,9 à 2,6 milliards de crédits carbone (ce qui représente 5 à 16 % des émissions des pays de l'annexe cette même année). Si seuls les projets correspondant à la différence entre le scénario alternatif et le scénario de référence de l'AIE sont éligibles, le montant de crédit généré ne sera que de 0,2 à 0,9 millions (soit seulement 1,3 à 5,6% des émissions des pays de l'annexe 1.)

4. L'aide publique au développement et les investissements directs à l'étranger

Sur l'année 2000, les pays en voie de développement ont reçu un flux financier de l'ordre de 225 milliards de dollars de la part des pays industrialisés. La figure 12 montre que l'aide au

⁴⁸ Voir à ce titre la note D4E B2-05-007 sur les projets MDP portant sur les HCFC 22.

développement ne représentait que 18 % de ce flux alors que les IDE (investissement direct à l'étranger) en représentaient 50%.

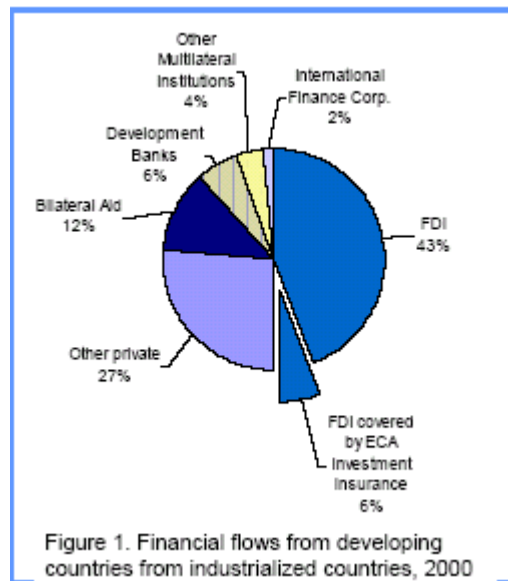


Figure 12 : répartition des flux financiers des pays industrialisés vers les PED, Source : Helme (2004)

Les investissements directs à l'étranger sont très importants en Amérique Latine et en Asie de l'Est. Néanmoins, dans certaines régions, en Afrique notamment, l'aide au développement représente toujours une part très importante des flux de capitaux (figure 13).

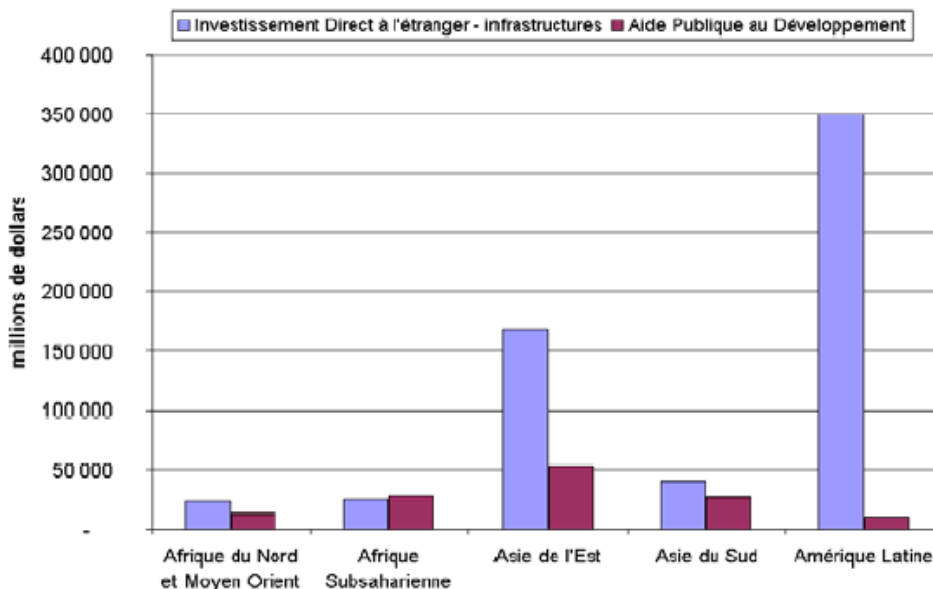


Figure 13 : répartition géographique des flux de capitaux privés dans les infrastructures et l'aide publique au développement pour la période 1990-2001. Source : Mathys (2004)

4.1. Verdir l'aide publique au développement

La banque mondiale s'est engagée en 2004 à augmenter de 20 % par an ses financements dans le domaine des énergies renouvelables (y compris l'hydroélectricité de moins de 10 MW)

et de l'efficacité énergétique dans les 5 prochaines années de manière à amener son financement pour ces énergies à 200 millions de dollars en 2010. Cet effort est à saluer ; il est cependant critiqué par les écologistes qui le considèrent trop faible au regard des dépenses annuelles de la banque mondiale dans le domaine de l'énergie : 2,5 milliards de dollars par an. La banque européenne pour la reconstruction et le développement a décidé depuis 18 mois de mener, pour tous les projets qu'elle finance dans des secteurs intensifs en énergie, une analyse des potentiels d'efficacité énergétique. Les clients de la banque ont ensuite le choix de suivre ou non les recommandations de l'analyse. Les premiers résultats apparaissent très positifs : 80 % des clients ont décidé de suivre les préconisations. Ce type de démarche pourrait être étendu aux autres banques de développement.

La plupart des projets financés par l'aide au développement sont soumis à des études d'impact environnementales. Les lignes directrices développées par la Banque mondiale (*World Bank guidelines and safeguard policies : OP4.01 on environmental assessment*) sont structurelles dans la mesure où elles sont ensuite reprises par de nombreuses institutions, que ce soit d'autres banques de développement ou les agences d'export crédit. Cependant, la stratégie de prêt de la banque mondiale a évolué ces dernières années et son action est de plus en plus axée sur les réformes structurelles et non les projets. En particulier, la banque mondiale a décidé depuis 1999 de développer des *poverty reduction strategy papers* pour les pays fortement endettés qui sont des stratégies très larges développées en collaboration avec le pays hôte et qui visent à donner une cohérence à l'aide au développement dans le pays sur le long terme. L'environnement n'est pratiquement pas pris en compte dans ces papiers stratégiques, c'est donc une évolution qui pourrait être envisagée à l'avenir.

4.2. Agir via les agences crédit à l'export

Les agences assurance crédit à l'exports (ACE) sont des agences financières gouvernementales dont le mandat est d'encourager les exportations de biens et services vers les pays en voie de développement. Pour ce faire, ces agences offrent aux compagnies des prêts, des garanties, de l'assurance de crédit ou de l'assistance technique financière (en France, c'est la COFACE : compagnie française d'assurance pour le commerce extérieur). Les ACE agissent en complément et non en substituts des banques : elles servent souvent de prêteur de dernier ressort en offrant du crédit quand les banques refusent d'investir. En 2000, les ACE ont couvert contre le risque les IDE pour 13 milliards de dollars. En prenant en compte les prêts à moyen et long terme, elles auraient été concernées par 85 milliards de dollars d'investissement en 2000 (Helme, D).

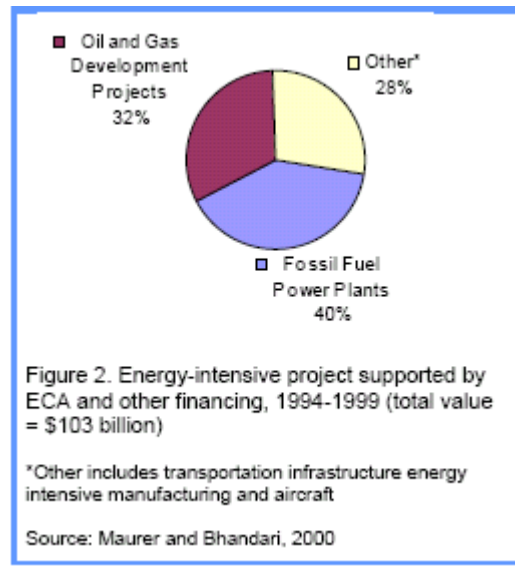


Figure 14 : Les investissements dans des projets intensifs en énergie des AEC

On estime que les IDE entre 1994 et 1999 dans des équipements intensifs en énergie étaient de 217 milliards de dollars, ce qui représente près de **41 milliards de dollars par an**. Les ACE ont été impliquées dans la moitié de ces investissements, elles peuvent donc avoir un impact significatif.

En 2001, le groupe du G8 sur les énergies renouvelables a estimé qu'étendre la puissance renouvelable installée dans les PED entre 2000 et 2010 pourrait coûter entre 40 milliards et 60 milliards en investissements et que 8 à 12 milliards (20 % des investissements) pourraient être financés par les ACE, de façon à combler la différence de coûts entre l'énergie renouvelable et les autres technologies. Un tel financement n'est pas faisable en l'état car les ACE, qui ont pour obligation d'être autonomes du point de vue financier, ont des marges de manœuvre relativement limitées en ce qui concerne les projets qui n'ont pas des taux de retour sur investissement très élevés. Leurs règles de soutien sont soumises à des arrangements relativement stricts.

L'Arrangement de l'OCDE⁴⁹ sur les crédits à l'exportation bénéficiant d'un soutien public

Cet Arrangement vise à encourager des règles du jeu uniformes en matière de soutien public afin d'encourager une concurrence entre exportateurs qui soit fondée sur la qualité et le prix des biens et des services exportés plutôt que sur les conditions financières les plus favorables qui bénéficient d'un soutien public.

L'arrangement fixe les délais de remboursement pour les pays de la Catégorie I (pays auxquels la Banque mondiale ne consent pas de prêts), à un maximum de cinq ans et les délais de remboursement pour les autres pays à un maximum de dix ans. En ce qui concerne l'aide liée (crédits à l'exportation et aide au développement), l'arrangement interdit d'accorder de l'aide liée aux pays qui, en raison de leur PNB par habitant, sont inéligibles à des prêts d'une durée de 17 ans de la Banque mondiale. Pour les autres pays, l'aide liée ne peut être accordée qu'aux projets publics ou privés qui seraient commercialement viables s'ils étaient financés aux conditions du marché ou aux conditions prévues dans l'Arrangement.

⁴⁹ Ont signé cet accord : Australie, Canada, Communauté européenne, Corée, États-Unis, Japon, Norvège, Nouvelle-Zélande et Suisse

Ces règles de l'arrangement de l'OCDE limitent fortement les marges de manœuvre des ACE pour donner des conditions spéciales de financement aux technologies propres. De plus, les pays émergents, où la croissance des émissions projetées est la plus forte, ne sont pas éligibles à l'aide liée.

Suite à une initiative conjointe de la France, l'Allemagne et du Royaume Uni, l'OCDE examine actuellement une proposition européenne visant à assouplir les règles de l'arrangement en matière de crédit à l'exportation dans le domaine des énergies renouvelables. Une extension du champ de cette réforme pourrait être envisagée sur les projets d'efficacité énergétique par exemple.

Différentes options sont envisageables pour faire évoluer les financements des agences de crédit à l'export vers le financement de technologies plus propres du point de vue du climat (Helme et Sussman (2004)) :

- Mettre en place un fonds, abondé par les pays développés, qui aurait le droit d'ajouter un financement additionnel aux projets financés par les ACE de façon à éliminer le désavantage en terme de coût des technologies propres comparé aux technologies conventionnelles. Cette solution permettrait d'éviter de mettre en péril la rentabilité financière des ACE. La difficulté est que les pays donateurs risquent de vouloir flécher leurs financements sur des technologies données ;
- Décider qu'un certain pourcentage, 5 à 10 %, du portefeuille des ACE devra nécessairement servir à financer des technologies propres. Cette solution est compatible avec l'arrangement de l'OCDE. Néanmoins, peu de projets sur les renouvelables arriveront à remplir les exigences de prêt des ACE si un financement additionnel n'est pas mis en place ;
- mettre en place des prêts à des taux d'intérêts plus faibles pour les technologies propres et des taux de retour plus long (frais réduits sur les coûts de transaction). Cette option nécessite de revoir l'arrangement et il est probable que des financements additionnels soient aussi nécessaires pour les ACE.

V. CONCLUSION

En conclusion, les différents dispositifs mis en place au niveau européen apparaissent cohérents et complémentaires : marché de permis européen, politiques de subvention aux renouvelables et intensification de l'effort de recherche. L'enjeu aujourd'hui est d'arriver à faire vivre et évoluer progressivement ces dispositifs.

En ce qui concerne l'international, une analyse plus précise des accords de collaboration existants pourrait permettre de déterminer les domaines où la collaboration internationale pourrait être approfondie. Il apparaît néanmoins que si l'effort de collaboration internationale est utile, ses perspectives sont limitées dans la mesure où la concurrence dans la recherche est à encourager dès que les inventions passent au stade de développement.

L'enjeu qui apparaît comme le plus fort est celui des transferts de technologie vers les pays en voie de développement. Les mécanismes mis en place par la convention climat (fonds pour l'environnement mondial et mécanisme de développement propre), ont su démontrer leur intérêt. Cependant, d'autres mécanismes innovants vont devoir être inventés pour intensifier l'effort de décarbonisation des pays en développement.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- AIE (2000), *Experience Curves for Energy Technology Policy*.
- AIE, (2004), *World Energy Outlook*.
- Alic J., Mowery D., Rubin E., (2003), *US technology and innovation policies, lessons for climate change*, Pew Center.
- Barrett, S. (2001), *Towards a better climate treaty policy matters*, 01-29, Brooking institution.
- Beise, M; Rennings, K. (2005), *Lead market and regulation : a framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations*. Ecological economics. Vol 52 (1).
- Beffa, J.L (2005), *Pour une nouvelle politique industrielle*, Rapport au Premier ministre.
- Betbèze, J. P, (2005), *Financer la R&D*, Rapport du CAE.
- Chambolle T. (2004), *Rapport sur les nouvelles technologies de l'énergie*.
- Commissariat général au plan, groupe présidé par Pascal Vignier (2002), *La France dans l'économie du savoir : pour une dynamique collective* .
- Fischer, C. Richard N. (2004), *Environmental and Technology Policies for Climate Change and Renewable Energy*, RFF Discussion Paper 04-05.
- Fischer, C. (2004), *Emissions Pricing, Spillovers, and Public Investment in Environmentally Friendly Technologies*. RFF Discussion Paper 04-02.
- GEF (2004), Program study on climate change
- Guellec, D, (1999), *Economie de l'innovation*, Collection Repère.
- Goulder, L. H, *Induced technological change and climate policy*, Pew Center, Standford University.
- Helme, N., Sussman F. (2004), *Harnessing financial flows from export credit agencies for climate protection*, CCAP.
- Jin et Lu (1999), *Clean Coal technology acquisition : present situation, obstacles, opportunities and strategies for China*, the third meeting of the second phase of CCIED
- Lako (2005), *Spillover effects from wind power*. Annexe D du rapport « *Spillover of climate policy* » ECN.
- Mathys S. (2004), *Intégration des pays en voie de développement dans les politiques climatiques. Application aux secteurs de l'électricité et des transports en Inde*. Thèse CIREDE.
- OCDE (2002), *Science technologie et industrie*, Perspectives de l'OCDE.
- Pew Center, (2004), *The 10-50 Solution. Technologies and Policies for a low carbon future*.
- Philibert, C. (2004), *International energy technology collaboration and climate change mitigation*, AIE
- Philibert, C. (2003), *Technology, innovation, development and diffusion*, AIE
- Philibert et Podkanski (2005), *Case study 4 : Clean coal technology*, AIE draft
- Popp, D. (2001), *The effect of new technology on energy consumption resource and energy economics*, 23, 215-239.
- Popp, D. (2002), *Induced innovation and energy prices*, American economic review, 92 (1), 160-180.
- Roach D et Klatzmann, J (1993), *Les transferts de technologie*, Que sais je ?, PUF
- Schumpeter, J. (1942), *Capitalism, Socialism and Democracy*, Harper, New York.
- Sijm, J. P. M. (2004), *Induced technological change and spillovers in climate change modeling, an assessment*, ECN.

I - Etudes :

- 05 - E04 Comment les politiques publiques peuvent-elles accélérer le progrès sur les technologies de lutte contre le changement climatique ?
Aurélie VIEILLEFOSSE
- 05 - E03 Modélisation du découplage des aides et environnement en agriculture
Elsa LAVAL
- 05 - E02 Efficacité de la filière piles et accumulateurs
Olivier ARNOLD
- 05 - E01 Les régulations environnementales ont-elles un effet sur le commerce extérieur de l'industrie française ?
Sébastien RASPILLER, Nicolas RIEDINGER, Céline BONNET
- 04 - E10 Les politiques environnementales ont-elles un impact sur la croissance ?
Nicolas RIEDINGER
- 04 - E09 Estimation des nuisances pour la collectivité générées par les éoliennes de Sigean
Sébastien TERRA
- 04 - E08 Stratégies d'échantillonnage et modèles de comptage dans la méthode des coûts de transport
Sébastien TERRA
- 04 - E07 Bien public global et instruments des politiques nationales unilatérales
Christine CROS, Sylviane GASTALDO
- 04 - E06 Principe de précaution et décision médicale
Dominique BUREAU, Emmanuel MASSE
- 04 - E05 Préservation des ressources globales et développement économique
Dominique BUREAU
- 04 - E04 Evaluation du coût subi par EDF suite à une mesure en faveur de la vie piscicole sur la Dordogne
Franck FREDEFON
- 04 - E03 Valorisation économique d'une amélioration de la qualité de l'eau de l'étang de Berre
Franck FREDEFON
- 04 - E02 La prise en compte du changement technique endogène affecte-telle l'équivalence entre taxes et permis ?
Gilles SAINT-PAUL
- 04 - E01 Les différences de sévérité environnementale entre pays influencent-elles les comportements de localisation des groupes français ?
Sébastien RASPILLER, Nicolas RIEDINGER
- 03 - E09 Evaluation économique des aménités récréatives d'un parc urbain : le cas du parc de Sceaux
Sylvie SCHERRER

Nouveautés

- 03 - E08 Analyse économique de la rentabilité des filtres à particules sur les véhicules diesels neufs
Emmanuel MASSE
- 03 - E07 Note sur l'évaluation des infrastructures de transport et l'étalement urbain
Dominique BUREAU, Nicolas THOUVEREZ
- 03 - E06 Evaluation des bénéfices pour le public de la protection des espaces littoraux remarquables
Sylvie SCHERRER
- 03 - E05 Evaluation économique des aménités récréatives d'une zone humide intérieure : le cas du lac de Der
Sylvie SCHERRER
- 03 - E04 Exploration des engagements futurs en matière de changement climatique
Vincent VAN STEENBERGHE
- 03 - E03 Quels instruments pour une politique environnementale ?
Gilles SAINT-PAUL
- 03 - E02 Couverture des charges d'infrastructure et tarification de l'usage de la route
Isabelle ROVIRA, Martine PERBET
- 03 - E01 Les dommages visuels et sonores causés par les éoliennes : une évaluation par le consentement à payer des ménages dans le cas des éoliennes de Sigean
Sylvie SCHERRER
- 02 - E07 Pollutions atmosphériques transfrontières : mise en œuvre du protocole de Goteborg et de la directive plafonds
Daniel DELALANDE
- 02 - E06 Régulation du bruit à Roissy : efficacité et instruments économiques
Dominique BUREAU
- 02 - E05 Gisement d'énergie éolienne par région : quelques éléments d'éclairage économique
Sabine GUILLAUME
- 02 - E04 Les accords de Bonn et Marrakech : analyse quantitative et mise en perspective
Sandrine ROCARD, Eve ROUMIGUIERES
- 02 - E03 Typologie des modes de gestion des déchets ménagers par les collectivités locales
Anne-Claire BOITEL, Christine LAGARENNE
- 02 - E02 Evaluation économique des pertes d'usage dues aux tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999 : le cas de la forêt de Fontainebleau
Sylvie SCHERRER
- 02 - E01 Régulation de la durée des contrats dans le secteur de l'eau
Patrick DERONZIER
- 01 - E07 Effet de serre document de base de la maquette SAGESSE
Eve ROUMIGUIERES

- 01 - E06 Déterminants de la consommation en produits de l'agriculture biologique
Sylvie SCHERRER
- 01 - E05 Effet de serre : quantification de l'effort économique par les parties du protocole de Kyoto
Eve ROUMIGUIERES
- 01 - E04 Déterminants des comportements de tri des ménages
Christine LAGARENNE, Séverine WILTGEN
- 01 - E03 Combinaison des instruments prix et quantités dans le cas de l'effet de serre
Boris COURNEDE, Sylviane GASTALDO
- 01 - E02 Politiques nationales de lutte contre le changement climatique et réglementation de la concurrence : le cas de la fiscalité
Jérôme RIEU
- 01 - E01 Effets économiques du Protocole de Kyoto : une maquette internationale
Jean-Pierre BERTHIER, Martin GUESPEREAU, Eve ROUMIGUIERES

II - Méthodes :

- 05 - M03 L'utilisation des méthodes d'options réelles
Emmanuel MASSE, Stéphane GALLON Nouveautés
- 05 - M02 Guide pour l'élaboration de cahiers des charges pour des études de valorisation des dommages et aménités environnementales en 5 questions/réponses
Sébastien TERRA
- 05 - M01 Guide pour la mise en œuvre de la méthode des prix hédoniques
Sébastien TERRA
- 04 - M07 Maquette ECHEANCES : Epuisement des Combustibles selon Hotelling et Application Naturelle au Contingentement de l'Effet de Serre
Hélène OLLIVIER
- 04 - M06 Articulation entre quotas échangeables et mesures de gestion des ressources halieutiques : éléments pour l'évaluation économique d'aires marines protégées
Dominique BUREAU
- 04 - M05 Qu'est-ce qu'un marché de permis ? Adaptation du jeu de simulation de l'ENSAE à un marché de crédits « Azote »
- 04 - M04 Tourisme, loi littoral et économie de l'environnement
Dominique BUREAU
- 04 - M03 Fiches DPSEEA élaborées à partir du rapport final de la commission d'orientation pour le plan santé Environnement
Camille FEVRIER
- 04 - M02 Arbitrages intertemporels, risque et actualisation
Stéphane GALLON, Emmanuel MASSE

- 04 - M01 Le cycle de la prévention et de l'information sur les risques
Patrick MOMAL
- 03 - M03 La culture du risque et de la sûreté
Patrick MOMAL
- 03 - M02 Rapport du groupe de réflexion environnement et applications de l'espace
Bertrand GALTIER, Michel LEBLANC
- 03 - M01 Le système d'information environnementale français
Armelle GIRY
- 02 - M02 Santé environnement : problèmes et méthodes
Benoît VERGRIETTE
- 02 - M01 Intérêts et limites des variables biologiques en écotoxicologie aquatique
Patrick FLAMMARION
- 01 - M02 Indicateurs environnementaux : méthodes et utilisation pour l'évaluation des politiques publiques
Xavier DELACHE
- 01 - M01 Méthodologie de valorisation des biens environnementaux
Sylvie SCHERRER

III - Synthèses :

- 05 - S02 Plan National d'Affectation des Quotas : retour d'expérience
Sébastien MERCERON

Nouveautés

- 05 - S01 Les différentes gestions du dossier de l'amiante
Grégoire LAGNY

- 04 - S07 Mécanismes économiques à l'œuvre sur la biodiversité dans les secteurs de l'agriculture, la forêt, l'eau, la pêche, le tourisme et les transports
Christine CROS
- 04 - S06 Evolution du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles
Annie ERHARD-CASSEGRAIN, Emmanuel MASSE, Patrick MOMAL
- 04 - S05 Développement durable et aménagement routier : le cas de la RN88
Stéphanie ANTOINE
- 04 - S04 L'économie de l'effet de serre : point sur les engagements internationaux de lutte contre le changement climatique
Aurélie VIEILLEFOSSE
- 04 - S03 Entreprises et développement durable
Irène CABY

- 04 - S02 Références méthodologiques pour la prise en compte de l'environnement dans les projets routiers
Stéphanie ANTOINE
- 04 - S01 Déchets ménagers en France. Financement du service et recyclage : Exemples de travaux d'évaluation économiques utiles à la décision publique
Patrick DERONZIER, Olivier ARNOLD
- 03 - S06 L'évaluation des aménités et des dommages environnementaux
Sylvie SCHERRER
- 03 - S05 Les enseignements pour la France des régimes de responsabilité environnementale en vigueur à l'étranger : l'exemple des Etats-Unis et du Brésil
Catherine SCHLEGEL, Laurent VERDIER
- 03 - S04 Les engagements futurs dans les négociations sur le changement climatique
Séminaire D4E
- 03 - S03 Economie de l'environnement et décision publique
Dominique BUREAU
- 03 - S02 Biens publics mondiaux et négociations internationales
Hélène FRANCES, François NASS
- 03 - S01 Axes pour la recherche en environnement et en développement durable dans le sixième programme cadre de recherche et développement de l'union européenne
Groupe thématique national français « recherche européenne, environnement et développement durable »
- 02 - S02 Marchés de droits : expériences passées et débuts pour l'effet de serre
Christine CROS, Sylviane GASTALDO
- 02 - S01 Microéconomie du développement durable : une introduction
Dominique BUREAU
- 01 - S05 L'impact économique des tempêtes de décembre 1999
Annie ERHARD-CASSEGRAIN
- 01 - S04 Ouverture des marchés de l'électricité et environnement
Dominique BUREAU, Sylvie SCHERRER
- 01 - S03 La responsabilité environnementale
Patrick MOMAL
- 01 - S02 Gouvernance mondiale et environnement
Dominique BUREAU, Marie-Claire DAVEU, Sylviane GASTALDO
- 01 - S01 Les rapports environnementaux des entreprises
Christine LAGARENNE, Marc AVIAM