

Chapitre 5

Politiques technologiques et de R-D

Ce chapitre examine l'impact de différents instruments stimulant la R-D et le déploiement de technologies, à l'aide d'un modèle qui intègre le processus de changement et d'innovation technologiques, c'est-à-dire les changements technologiques induits. Il commence par passer en revue l'évolution des dépenses consacrées à la R-D liée à l'énergie, puis évalue l'impact des politiques et dépenses de R-D sur l'innovation et le déploiement de technologies. Il analyse ensuite les effets de la tarification du carbone et des politiques technologiques sur les coûts d'atténuation du changement climatique. Enfin, il examine la question de savoir si les politiques technologiques peuvent donner des résultats en l'absence de tarification du carbone.

Principaux messages

- *Pour accélérer l'émergence et le déploiement de technologies sobres en carbone, il faudra à terme redéployer davantage de ressources financières vers la R-D énergétique. Les progrès techniques devront permettre d'atteindre deux objectifs : faire baisser le coût des technologies existantes ou nouvelles qui contribuent à réduire les émissions, et étoffer la panoplie des technologies disponibles et leur potentiel en matière d'atténuation. Toutefois, les dépenses publiques moyennes engagées au titre de la R-D liée à l'énergie dans les pays de l'OCDE ont considérablement diminué depuis le pic enregistré au début des années 80.*
- *La tarification des émissions de GES – notamment avec la suppression des subventions implicites aux émissions telles que les subventions aux énergies fossiles – augmente la rentabilité attendue de la R-D dans les technologies sobres en carbone. Si elles sont anticipées comme il convient, les hausses futures des prix du carbone exerceront un effet puissant sur les dépenses de R-D et la diffusion de technologies propres. Par exemple, d'après les estimations, en cas d'adoption d'une trajectoire d'évolution du prix mondial du carbone destinée à stabiliser la concentration de CO₂ à 450 ppm et celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂ à l'horizon 2050, les dépenses en R-D énergétique et les investissements dans la production d'électricité d'origine renouvelable devraient quadrupler.*
- *La R-D visant à améliorer l'efficacité énergétique des technologies existantes n'aurait que des effets limités sur les coûts de stabilisation de la concentration de GES, alors que la R-D axée sur la mise au point de nouvelles technologies majeures à faible émission de carbone pourrait abaisser ces coûts dans des proportions considérables en cas de succès. Ce constat souligne l'importance du développement de nouvelles technologies sans carbone dans les secteurs autres que l'électricité, à commencer par le secteur des transports, où les solutions disponibles sur le marché offrent moins de possibilités de réduction des émissions.*
- *Si elle crée bien des incitations en faveur de la R-D, la tarification des émissions de GES ne corrige pas toutes les imperfections du marché qui entravent aujourd'hui la R-D et le déploiement de technologies. Il importera donc de prendre des mesures complémentaires en matière de R-D pour réduire les coûts de stabilisation de la concentration de CO₂ dans le monde, aider à surmonter les défaillances du marché et partager les connaissances au niveau international. À titre d'exemple, un fonds mondial pour la R-D, ayant pour objectif de subventionner la R-D et/ou le déploiement de technologies à faible émission de carbone, pourrait réduire encore les coûts d'atténuation s'il venait en complément de la tarification du carbone. Un signal de prix fort devra émaner de la tarification du carbone, non seulement pour créer des incitations privées suffisantes en faveur de l'innovation, mais aussi pour encourager producteurs et consommateurs à passer aux technologies sobres en carbone.*

Introduction

Un cadre d'action efficace par rapport à son coût face au changement climatique devrait favoriser une R-D efficiente, l'innovation et la diffusion de technologies réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les progrès techniques devront permettre d'atteindre deux objectifs :

- *Faire baisser le coût des technologies existantes ou émergentes qui ont pour effet de réduire les émissions.* Dans la plupart des principales activités économiques émettrices, les nouvelles technologies à faible émission de carbone sont bien plus coûteuses que les technologies basées

sur les combustibles fossiles qu'elles ont vocation à remplacer¹, et elles le resteront à court terme, même en présence d'un prix du carbone modéré (AIE, 2008b). Par exemple, le coût moyen de réduction des émissions à l'aide d'un ensemble typique de technologies à faible émission de carbone dans les secteurs de l'électricité, de l'industrie, des transports et du bâtiment a été estimé à plus de 80 USD par tonne de CO₂ en 2005, et il dépasse les 140 USD dans des secteurs autres que la production d'électricité (Anderson, 2006).

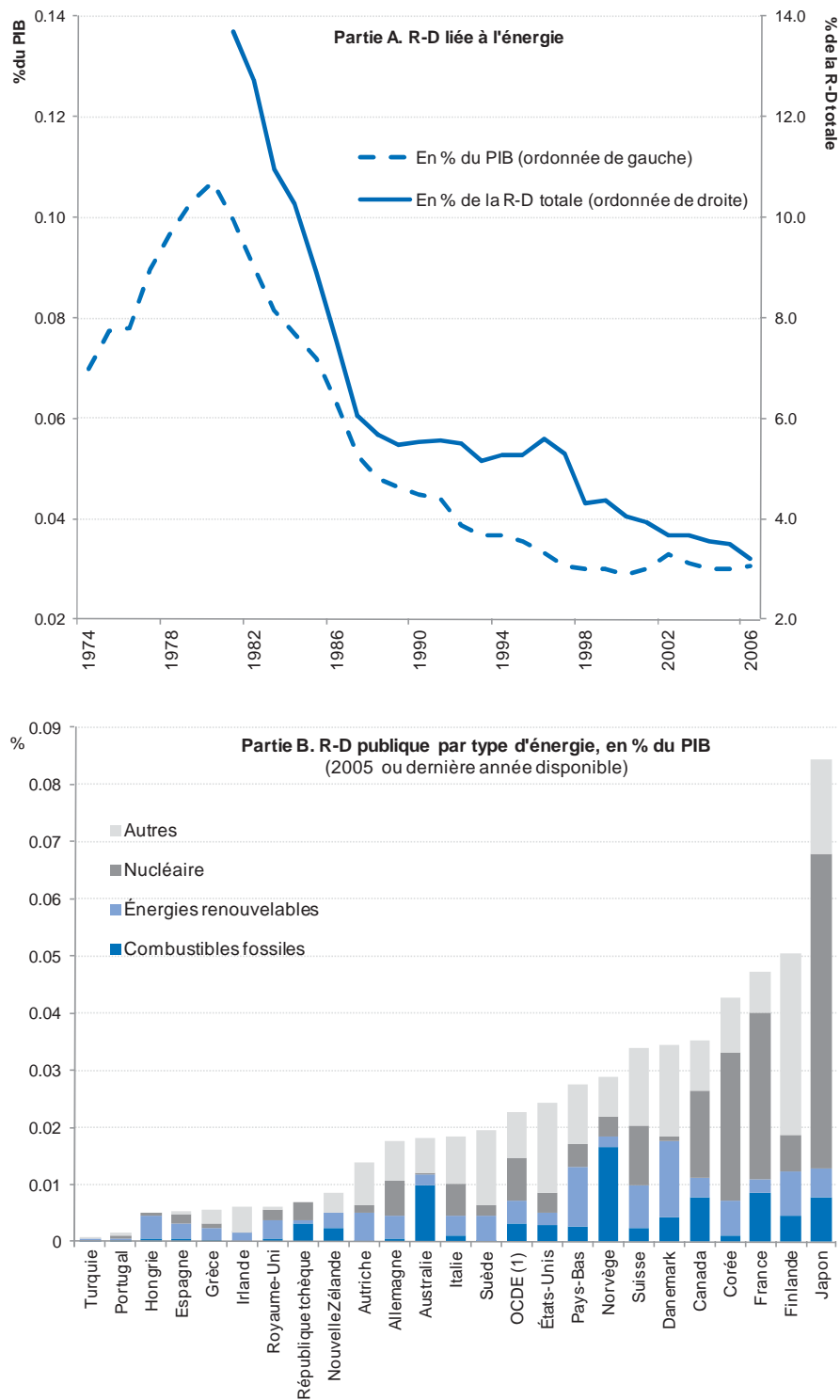
- *Étoffer la panoplie des technologies disponibles et accroître leur potentiel en matière d'atténuation.* A l'heure actuelle, la portée et la gamme des technologies à faible émission de carbone envisagées pour l'avenir sont plutôt restreintes (Anderson, 2006). La plupart sont des technologies spécialisées et non génériques, et leur utilisation potentielle se limite à un éventail réduit d'activités économiques (l'éolien, le solaire et le nucléaire pour la production d'électricité, l'hydrogène et les biocarburants dans les transports, etc.). Par ailleurs, des difficultés persistent (stockage de l'énergie, par exemple), de sorte que la réduction des émissions d'un secteur donné ne saurait être obtenue en appliquant une seule solution. Aussi faudra-t-il sans doute recourir à tout un arsenal d'options technologiques pour parvenir à atténuer le changement climatique (voir, par exemple, Pacala et Socolow, 2004)².

Ce chapitre expose les tendances récentes des dépenses de R-D liée à l'énergie et examine dans quelle mesure le secteur privé est incité à innover dans le cadre de différents scénarios de réduction des émissions et des trajectoires d'évolution des prix du carbone correspondantes. Le rôle potentiel de l'investissement en R-D dans la mise au point de nouvelles technologies est analysé, en tenant compte notamment des contraintes auxquelles se heurte l'expansion des technologies à faible émission de carbone existantes, telles que l'électronucléaire ou le captage et le stockage du carbone (CSC). Enfin, eu égard aux défaillances du marché qui compromettent les incitations en faveur de la R-D privée, les possibilités de soutenir l'investissement en R-D au travers des politiques publiques sont mises en exergue.

5.1. Tendances récentes des dépenses de R-D énergétique

Pour accélérer l'émergence et le déploiement de technologies à faible émission de carbone, il conviendra à terme d'augmenter – et de redéployer – les ressources financières consacrées à la R-D liée à l'énergie. Les dépenses publiques moyennes engagées au titre de la R-D liée à l'énergie dans les pays de l'OCDE ont considérablement diminué depuis le pic enregistré au début des années 80 (graphique 5.1, partie A), même si le niveau de dépenses varie grandement selon les pays (graphique 5.1, partie B). Il n'existe pas de données complètes sur la R-D liée à l'énergie dans le secteur privé, mais les éléments dont on dispose donnent à penser que sa part dans les dépenses globales de R-D privée est faible par rapport à d'autres secteurs et a baissé au cours des deux dernières décennies (Doornbosch et Steenblik, 2007 ; AIE, 2008b)³. Par le passé, les baisses constatées des dépenses publiques et privées de R-D ont été en partie attribuées à la chute continue des prix du pétrole à la suite du deuxième choc pétrolier, qui a réduit les incitations en faveur de la recherche et contribué – aux côtés des préoccupations concernant la sûreté, l'élimination des déchets et la prolifération – à la réduction progressive des programmes nucléaires publics.

Graphique 5.1. Dépenses publiques de R-D liée à l'énergie dans les pays de l'OCDE



1. Moyenne non pondérée des pays de l'OCDE à l'exception des pays non membres de l'AIE (Islande, Mexique, Pologne et République slovaque). Faute de données suffisantes, le graphique ignore également la Belgique et le Luxembourg.

Source : Base de données de l'AIE.

Plus largement, l'atténuation du changement climatique exigera une augmentation des dépenses à tous les stades du processus de développement technologique, de la R-D à la démonstration, au déploiement, puis à la diffusion. Surtout, il ressort des données d'observation que la plupart des nouvelles technologies à faible émission de carbone peuvent donner lieu à des « effets d'apprentissage » notables, c'est-à-dire que leurs coûts baissent au fur et à mesure que l'expérience acquise s'accroît (voir, par exemple, AIE, 2000 ; McDonald et Schrattenholzer, 2001 ; Neij *et al.*, 2003a, 2003b). Par exemple, des taux d'apprentissage – la réduction en pourcentage des coûts d'investissement unitaires pour chaque doublement de l'investissement cumulé – de l'ordre de 10 à 20 % ont généralement été constatés pour les technologies des énergies éolienne et solaire. Ainsi, avant que les technologies à faible émission de carbone ne deviennent compétitives aux prix du marché, il peut être nécessaire de consacrer des sommes importantes à leur déploiement. Néanmoins, l'ampleur comme la nature même des effets d'apprentissage ne sont pas clairement établies, et leurs implications pour l'action des pouvoirs publics sont loin d'être évidentes, comme on le verra ci-après.

5.2. Instruments d'action permettant de stimuler la R-D et le déploiement de technologies

5.2.1. Impact dynamique des instruments fondés sur les prix en termes de promotion de l'adoption de technologies

La tarification des émissions de GES – au moyen d'instruments qui rendent ces émissions « payantes », comme la suppression des subventions aux combustibles fossiles – augmenterait la rentabilité attendue de la R-D dans les technologies à faible émission de carbone. Compte tenu du phénomène des effets d'apprentissage, la tarification aboutit également à une réduction des coûts de déploiement totaux prévus, qui sont nécessaires pour que les technologies existantes respectueuses du climat deviennent compétitives. Les effets de la tarification des émissions sur la rentabilité attendue devraient être plus importants pour les technologies comme le CSC, qui n'entraînent pas de gains financiers privés car elles touchent seulement *l'intensité en carbone* de l'énergie (émissions de GES par unité d'énergie) et non *l'efficacité* énergétique (nombre d'unités d'énergie par unité de production). Plus largement, la tarification des émissions constitue pour les émetteurs une incitation constante à mettre au point ou à employer des technologies qui réduisent les émissions. C'est ce qu'on appelle l'efficacité dynamique des mécanismes fondés sur les prix⁴. Toutefois, comme cela est indiqué plus loin, la crédibilité du signal de prix a également son importance car les investissements en R-D et/ou la mise en place de technologies nouvelles impliquent des coûts irrécupérables. Dans la pratique, il ressort des données d'observation que les activités privées de R-D et d'innovation des entreprises ont été sensibles à certaines fluctuations des prix de l'énergie dans le passé (Popp, 2002 ; Johnstone *et al.*, 2008). Le lien relativement fort observé il y a peu encore entre les fluctuations du prix du pétrole et les dépenses publiques de R-D donnent à penser que les pouvoirs publics répondent également aux incitations de prix.

5.2.2. Quantification des effets de la tarification du carbone sur les changements technologiques induits et les coûts d'atténuation

Le modèle WITCH (*World Induced Technological Change Hybrid*) a été utilisé afin de déterminer les incidences quantitatives de la tarification du carbone sur la R-D et le déploiement de technologies, ainsi que le degré auquel les changements technologiques suscités par le prix du carbone – ou « changements technologiques induits » – peuvent au bout du compte abaisser les coûts de réduction des émissions. Contrairement au modèle ENV-Linkages, WITCH intègre un mécanisme explicite et endogène par lequel les mesures incitatives influencent le progrès technique (Bosetti *et al.*, 2006, 2007, 2009a, encadré 5.1)⁵. Les simulations confirment la puissance incitative de la tarification du carbone. Par exemple, en cas de mise en place d'une trajectoire du prix mondial du carbone propre à stabiliser la

concentration de CO₂ à 450 ppm et celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂ en 2050⁶, les dépenses en R-D énergétique et les investissements dans l'installation de technologies de production d'électricité d'origine renouvelable seraient multipliés par quatre environ par rapport au scénario de référence (graphique 5.2). Ces effets s'amplifient au fil du temps et/ou lorsque les objectifs de concentration deviennent plus stricts, reflétant un prix du CO₂ plus élevé. De fait, les coûts marginaux d'atténuation augmentant de manière disproportionnée à mesure que la réduction des émissions progresse, les investissements en technologie croissent eux aussi de manière disproportionnée à mesure que l'objectif de réduction des émissions devient plus rigoureux. Il en résulte notamment qu'il faut un signal de prix du carbone fort à long terme pour encourager aujourd'hui les investissements dans la R-D et le déploiement de technologies sobres en carbone. En effet, en présence de niveaux de prix du carbone similaires, les investissements en R-D sont bien plus élevés si l'objectif de concentration de GES est fixé à 550 ppm éq. CO₂ (concentration de CO₂ de 450 ppm) que s'il est fixé à 650 ppm éq. CO₂ (concentration de CO₂ de 550 ppm), car on peut alors logiquement anticiper des hausses plus importantes des prix du carbone à l'avenir (graphique 5.3).

Toutefois, l'analyse laisse penser que les changements technologiques induits liés à des investissements supérieurs en matière de R-D et de déploiement de technologies pourraient n'avoir que peu d'effets sur les coûts d'atténuation, surtout dans le cadre d'objectifs de concentration de CO₂ moins stricts. On peut le déduire de l'augmentation limitée de ces coûts lorsqu'ils sont estimés dans un scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ (stabilisation de celle de CO₂ à 450 ppm) où la R-D est maintenue à son niveau de référence en ignorant les changements technologiques induits, et dans l'hypothèse d'une absence d'effets d'apprentissage par la pratique (graphique 5.4). La tarification du carbone dans ce modèle freine les émissions principalement en encourageant le passage à des modes de production et de consommation à moindre intensité de carbone, mais les incidences sur les changements technologiques induits apparaissent plus faibles comparativement, et ce pour deux raisons principales :

- i) Dans le secteur de l'électricité, des solutions limitant les émissions de carbone existent déjà de nos jours, notamment l'énergie nucléaire et, dans une moindre mesure, les techniques de captage et de stockage du carbone. Elles devraient à l'avenir représenter une part plus importante de la palette énergétique dans un contexte d'augmentation du prix du carbone (graphique 5.5). Si, pour des raisons technologiques, politiques ou de sûreté, le recours à l'énergie nucléaire et aux techniques de CSC est freiné, les investissements dans la R-D et la production d'électricité d'origine renouvelable augmenteront, mais dans le même temps, ce sera aussi le cas des coûts globaux d'atténuation, car des restrictions auront été imposées à l'accès à certaines possibilités relativement bon marché de réduction des émissions (graphique 5.6). Par conséquent, il semble au moins aussi important d'exploiter toutes les solutions techniques disponibles actuellement que de favoriser la mise au point de nouvelles au moyen d'investissements en R-D si l'on veut limiter les coûts globaux de la lutte contre le changement climatique.
- ii) La diminution de l'impact marginal de la R-D sur l'efficacité énergétique et l'atténuation des effets d'apprentissage dans le domaine des énergies renouvelables limiteront à terme les bénéfices susceptibles d'être tirés des changements technologiques induits.

Encadré 5.1 Principales caractéristiques du modèle WITCH

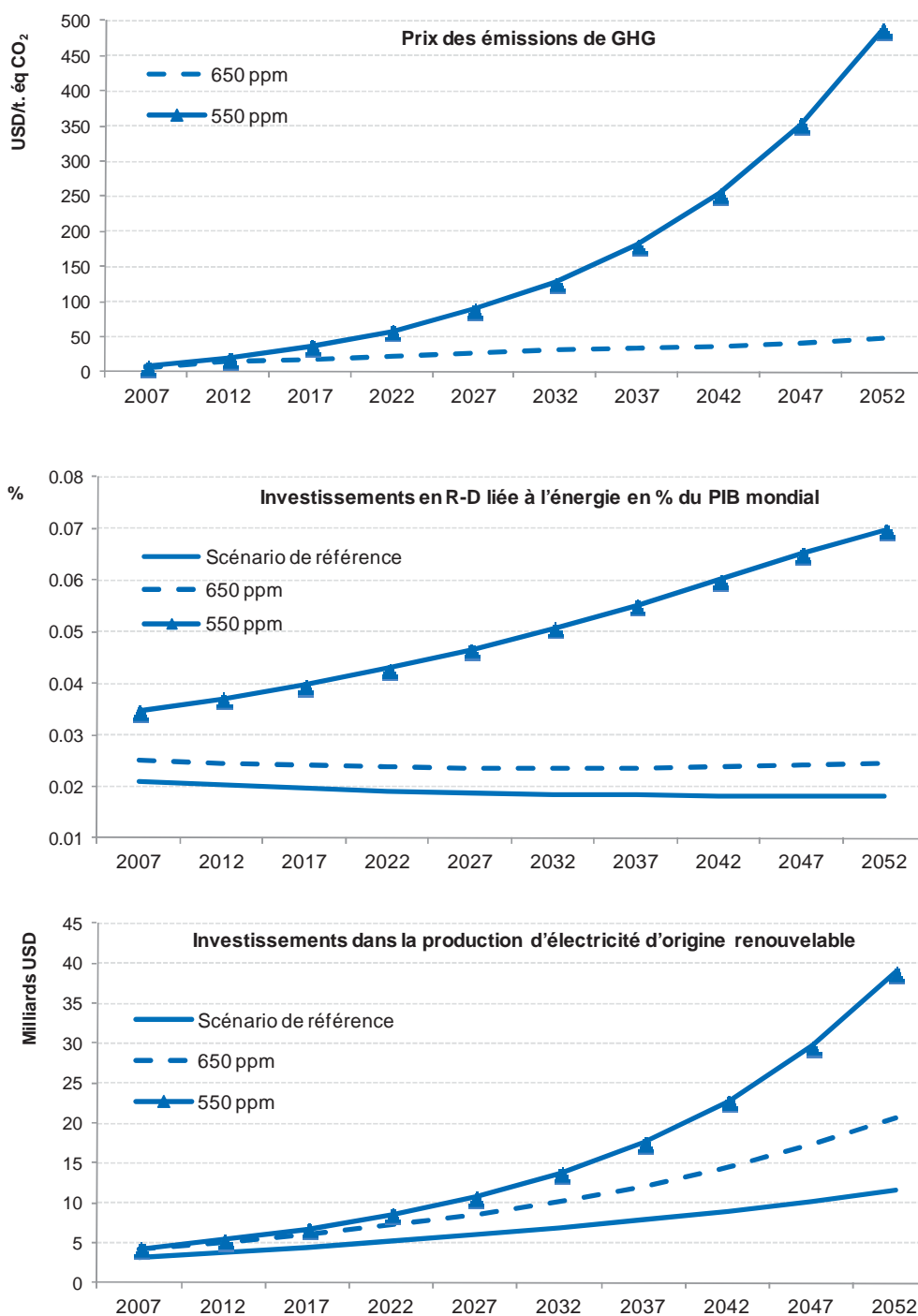
Le modèle WITCH donne une représentation détaillée du secteur de l'énergie dans un modèle de croissance économique intertemporel. Il permet d'étudier les questions liées aux technologies dans un cadre d'équilibre général. Par ailleurs, suivant des travaux antérieurs réalisés par Nordhaus et Boyer (2000) et Popp (2004), les pays du monde sont groupés en 12 régions prévoyantes qui interagissent stratégiquement pour déterminer les meilleures stratégies en matière de R-D et d'investissements face aux externalités environnementales – les futurs dommages attendus du fait du changement climatique sont explicitement pris en compte – et technologiques. Le modèle intègre les émissions de CO₂, mais pas celles d'autres GES.

Quatre situations principales susceptibles de donner lieu à des changements technologiques induits et à des externalités technologiques sont considérées dans l'analyse :

- i. L'augmentation des dépenses publiques de R-D entraîne un accroissement des connaissances dans le domaine de l'énergie, ce qui améliore l'efficacité énergétique, avec un rendement social élevé mais qui va diminuant. Chaque région s'approprie entièrement ces bénéfices, c'est-à-dire qu'il est supposé implicitement que les droits de propriété intellectuelle (DPI) internalisent les externalités au niveau régional. Toutefois, le capital de connaissances en matière d'énergie acquis dans une région a des retombées sur d'autres zones géographiques (voir Bosetti *et al.*, 2008, pour des informations plus détaillées). Par manque de données, seule la R-D publique est modélisée dans la version actuelle de WITCH, mais on peut supposer que la R-D privée réagirait de façon similaire aux incitations qui sont associées aux mesures d'atténuation du changement climatique.
- ii. L'apprentissage par la pratique réduit progressivement le coût de plusieurs technologies à faible émission de carbone dans le secteur de l'électricité, à savoir le solaire et l'éolien. Ces effets concernent la capacité cumulée *mondiale*, d'où des retombées au niveau international.
- iii. Le coût des technologies solaires et éoliennes et de la production d'électricité à partir de charbon avec captage et stockage du carbone (CSC) est également abaissé grâce à la recherche publique, et dans ce cas aussi le rendement va diminuant. Il y a toutefois des limites à l'utilisation des technologies de CSC, qui tiennent notamment au fait que les dépôts ne sont pas inépuisables et que le captage est imparfait.
- iv. Dans certaines des simulations effectuées spécifiquement pour le présent ouvrage, la R-D et l'apprentissage par la pratique sont également supposés aboutir à certaines technologies de rechange à long terme (technologies nouvelles) dans les secteurs électrique et/ou non électrique. Les investissements en R-D pourraient ainsi non seulement améliorer les technologies actuelles, mais aussi favoriser d'importantes percées technologiques qui viendraient compléter l'éventail des solutions disponibles pour remplacer les technologies à forte émission de carbone. Il est vraisemblable que ces technologies de rechange associeront des technologies nouvelles qui n'ont pas aujourd'hui pris pied sur le marché, notamment des technologies nucléaires de pointe dans le secteur électrique, et les véhicules électriques et à pile à hydrogène dans le secteur non électrique. L'incorporation dans le modèle des incidences de la R-D et de l'apprentissage par la pratique sur le coût d'investissement de ces technologies de rechange repose en partie sur l'expérience acquise précédemment dans le contexte de l'énergie solaire, éolienne et nucléaire (comme cela est illustré dans les estimations des courbes d'apprentissage à deux facteurs dans les études empiriques ; Bosetti *et al.*, 2009a).

L'étalonnage des paramètres est fondé sur les meilleures données empiriques disponibles, mais il faut savoir que certaines d'entre elles sont entourées de fortes incertitudes, notamment l'élasticité de la R-D par rapport aux prix de l'énergie, le rendement social de la R-D, le processus de création et de diffusion de nouvelles technologies, les taux d'apprentissage et l'ampleur des retombées internationales. Par conséquent, si les principales constatations présentées ci-après sont solides, il convient d'être prudent lors de l'interprétation des résultats quantitatifs (pour plus de données, notamment une analyse de sensibilité, voir Bosetti *et al.*, 2009a).

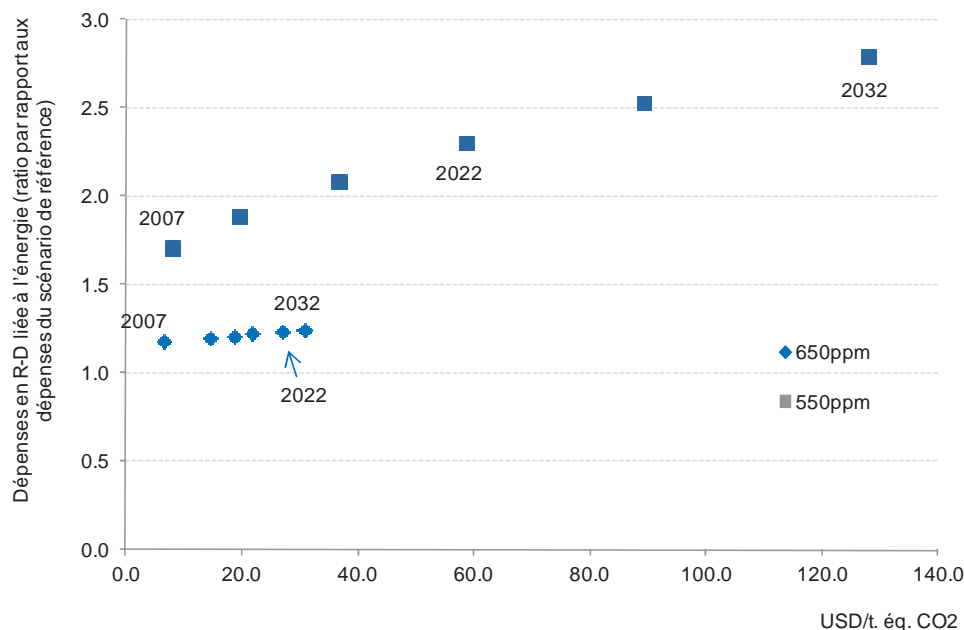
Graphique 5.2. Prévisions d'investissements en matière de R-D et de déploiement de technologies de production d'électricité d'origine renouvelable selon différents scénarios de prix mondial des émissions de GES (scénarios de stabilisation de la concentration de GES à 650 ppm et 550 ppm éq. CO₂)



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

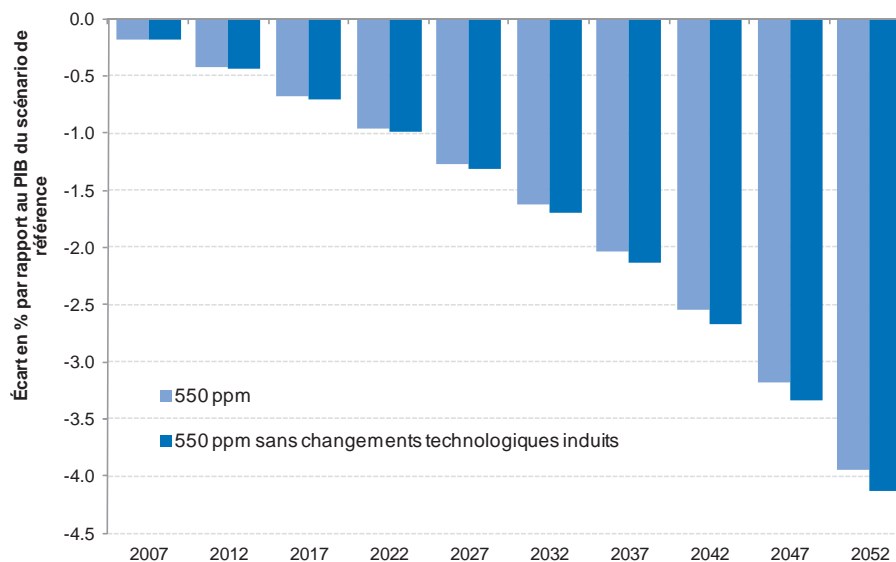
Graphique 5.3. Investissements mondiaux en R-D liée à l'énergie et prix des émissions de GES dans les scénarios de stabilisation de la concentration de GES à 650 ppm eq. CO_2 et 550 ppm eq. CO_2



1. Les émissions de GES autres que le CO_2 ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm eq. CO_2 exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO_2 à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO_2 . La stabilisation de la concentration de CO_2 à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm eq. CO_2 .

Source : Simulations sur modèle WITCH.

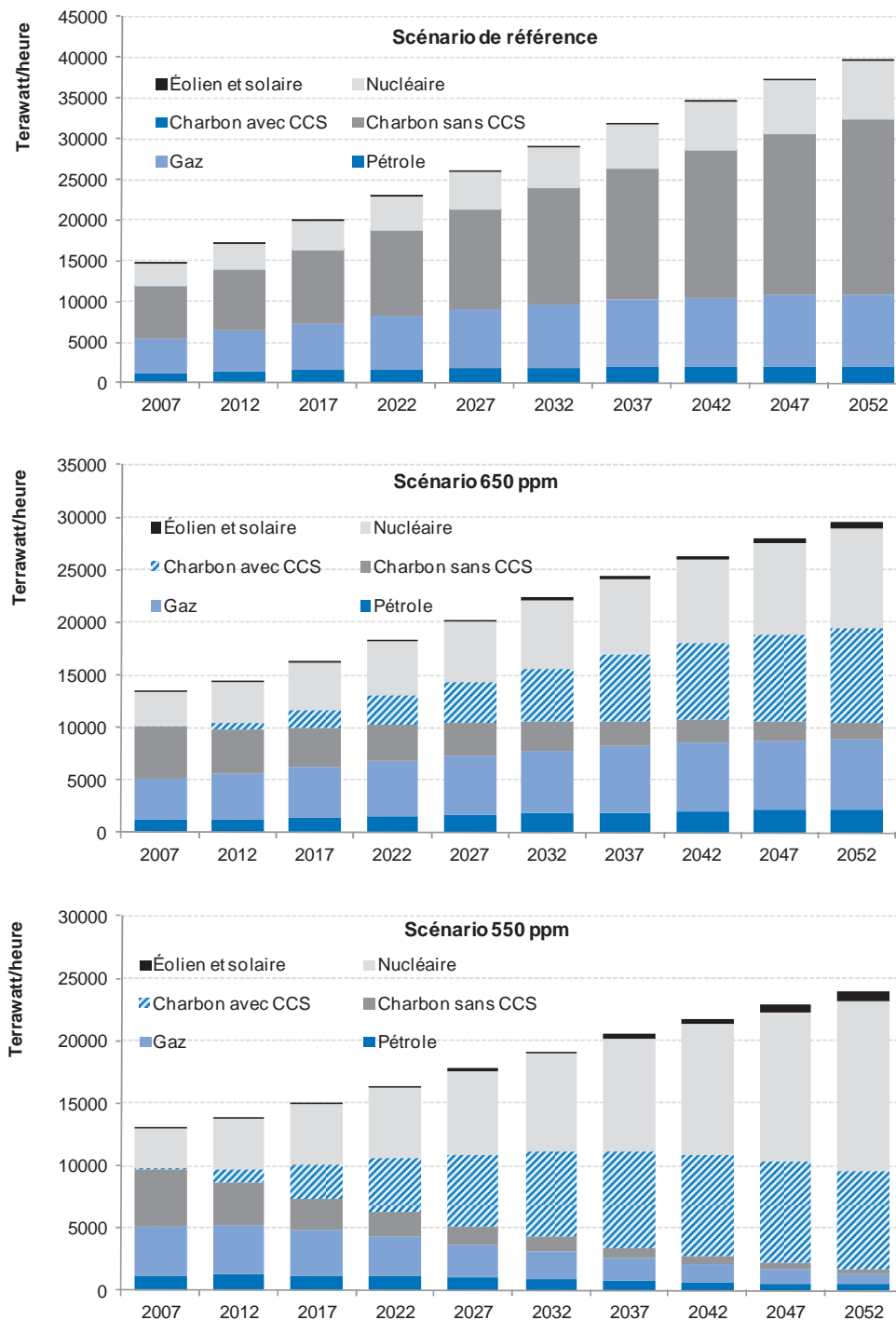
Graphique 5.4. Prévisions des coûts en termes de PIB mondial dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm eq. CO_2 , avec et sans changements technologiques induits



1. Les émissions de GES autres que le CO_2 ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm eq. CO_2 exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO_2 à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO_2 . La stabilisation de la concentration de CO_2 à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm eq. CO_2 .

Source : Simulations sur modèle WITCH.

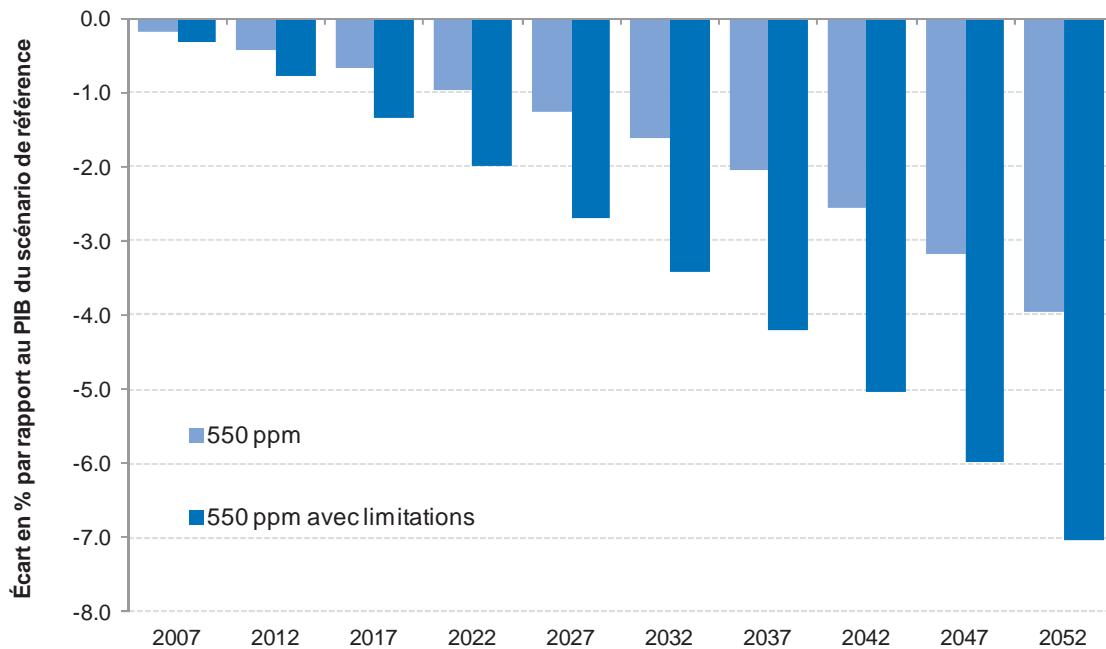
Graphique 5.5. Prévisions du bouquet énergétique dans le secteur de l'électricité dans les scénarios de référence et de stabilisation de la concentration de GES à 650 ppm éq. CO₂ et 550 ppm éq. CO₂



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

Graphique 5.6. Prévisions des coûts en termes de PIB mondial dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂, avec et sans limitations pesant sur l'énergie nucléaire et les technologies de CSC



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

5.2.3. Tarification du carbone et percées technologiques

Dans l'analyse qui précède, nous nous sommes concentrés sur la R-D progressive visant à améliorer l'efficacité énergétique et sur la diffusion des technologies à faible émission de carbone *existantes*. Cependant, les politiques d'atténuation pourraient aussi promouvoir le développement et le déploiement d'importantes technologies *nouvelles* sobres en carbone qui, à long terme, remplaceraient à grande échelle des technologies existantes. Les conséquences en termes de coûts de la mise au point et de la diffusion éventuelles de telles « technologies de rechange » sont examinées ci-après.

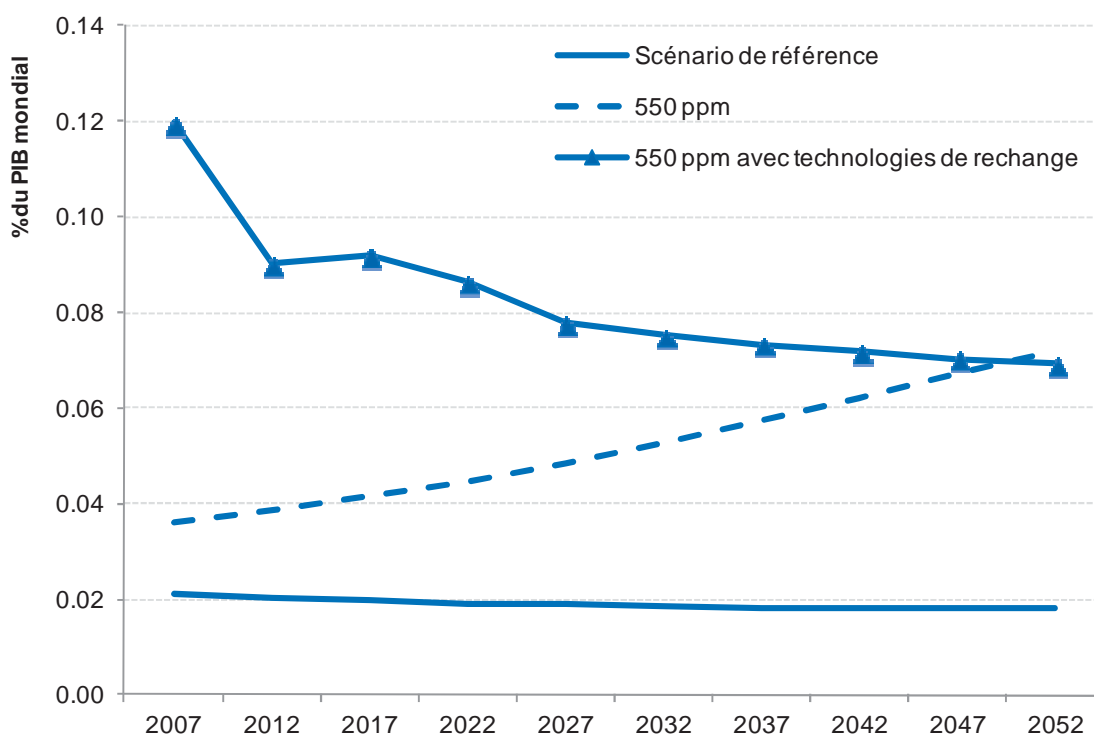
Dans la mesure où le développement de technologies de rechange dans le secteur électrique serait motivé entre autres par l'existence de limites au déploiement de technologies déjà disponibles, la puissance électronucléaire installée est présumée limitée au niveau actuel dans la majeure partie de l'analyse. De fait, en l'absence de telles limites, la mise au point de nouvelles technologies dans le secteur électrique ne serait guère nécessaire, du moins dans le contexte du modèle WITCH. Par conséquent, trois scénarios différents ont été envisagés dans le cadre de l'objectif de stabilisation de la concentration de GES à long terme à 550 ppm éq. CO₂ (stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm) :

- deux technologies de rechange apparaissent, soit une dans le secteur électrique et une dans le secteur non électrique ;

- seule apparaît une solution de rechange dans le secteur électrique ;
- seule apparaît une solution de rechange dans le secteur non électrique, auquel cas aucune limite n'est imposée à l'énergie nucléaire.

Dans les simulations exposées ci-après, on présume que tous les agents sont parfaitement au courant de la disponibilité des solutions de rechange à l'avenir.

Graphique 5.7. Prévisions des investissements mondiaux en R-D dans le domaine de l'énergie dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂, avec et sans technologies de rechange



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

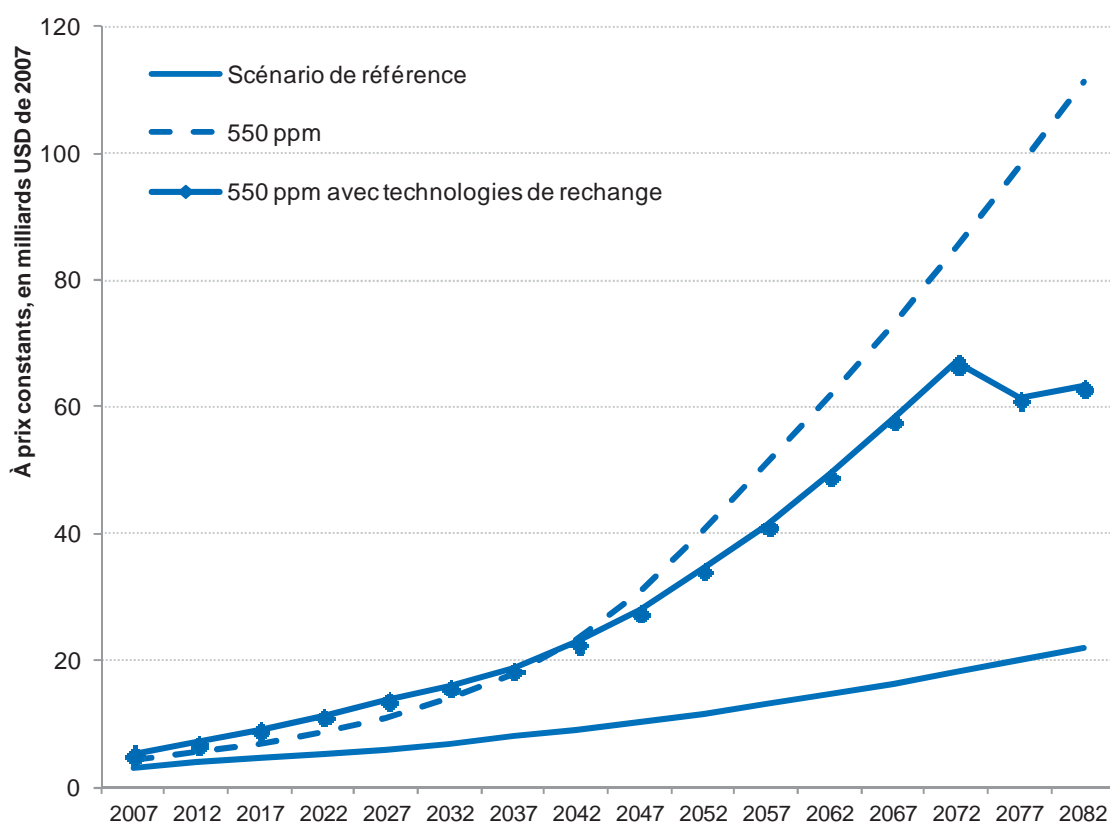
Source : Simulations sur modèle WITCH.

Contrairement à la plupart des études publiées, les simulations présentées ici ne supposent pas que des technologies de rechange apparaîtront sans investissements spécialisés, mais posent une hypothèse plus réaliste, à savoir que de telles technologies deviendront disponibles à l'avenir uniquement si des investissements adéquats sont auparavant consacrés à la R-D. Dans ces conditions, dans le cadre du scénario de tarification mondiale du carbone destinée à stabiliser la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂, on estime que la disponibilité future de technologies de rechange dans les secteurs électrique et non électrique implique une hausse substantielle des investissements mondiaux dans la R-D énergétique au cours des prochaines décennies (graphique 5.7). Cet accroissement est particulièrement marqué au début de la période de modélisation (c'est-à-dire au moment de l'annonce et de la mise en œuvre de la politique de tarification du carbone), où les dépenses en R-D énergétique s'élèvent à environ 0,12 % du

PIB mondial, soit plus que le niveau record de 0.08 % atteint dans les années 80. La courbe des dépenses en R-D témoigne de la nature de l'investissement dans la réalisation de percées technologiques. En l'occurrence, le rendement marginal est très élevé au départ, et il diminue ensuite progressivement à mesure que le stock de R-D s'accumule et que les possibilités de nouvelles réductions des coûts via de nouveaux investissements en R-D s'amenuisent – surtout lorsque la technologie est disponible et compétitive. Le coût des technologies de rechange évolue selon une courbe en S inversé : la R-D fait rapidement baisser les coûts dans les premières phases, au cours desquelles les technologies en question restent très onéreuses. Après 2030-2040, de nouvelles baisses de coûts interviennent principalement sous l'effet de l'apprentissage par la pratique, les technologies étant déployées.

La part des technologies de rechange dans la production énergétique augmente rapidement dans les simulations. Dans le secteur électrique, la technologie de rechange offrirait une solution de remplacement au vaste déploiement de l'électronucléaire prévu dans la section précédente (graphique 5.5). Dans le secteur non électrique, elle aurait surtout pour effet d'assouplir les prescriptions en matière d'économies d'énergie nécessaires pour atteindre l'objectif d'émission.

Graphique 5.8. Investissement dans la production d'électricité éolienne et solaire dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂, avec et sans technologies de rechange



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

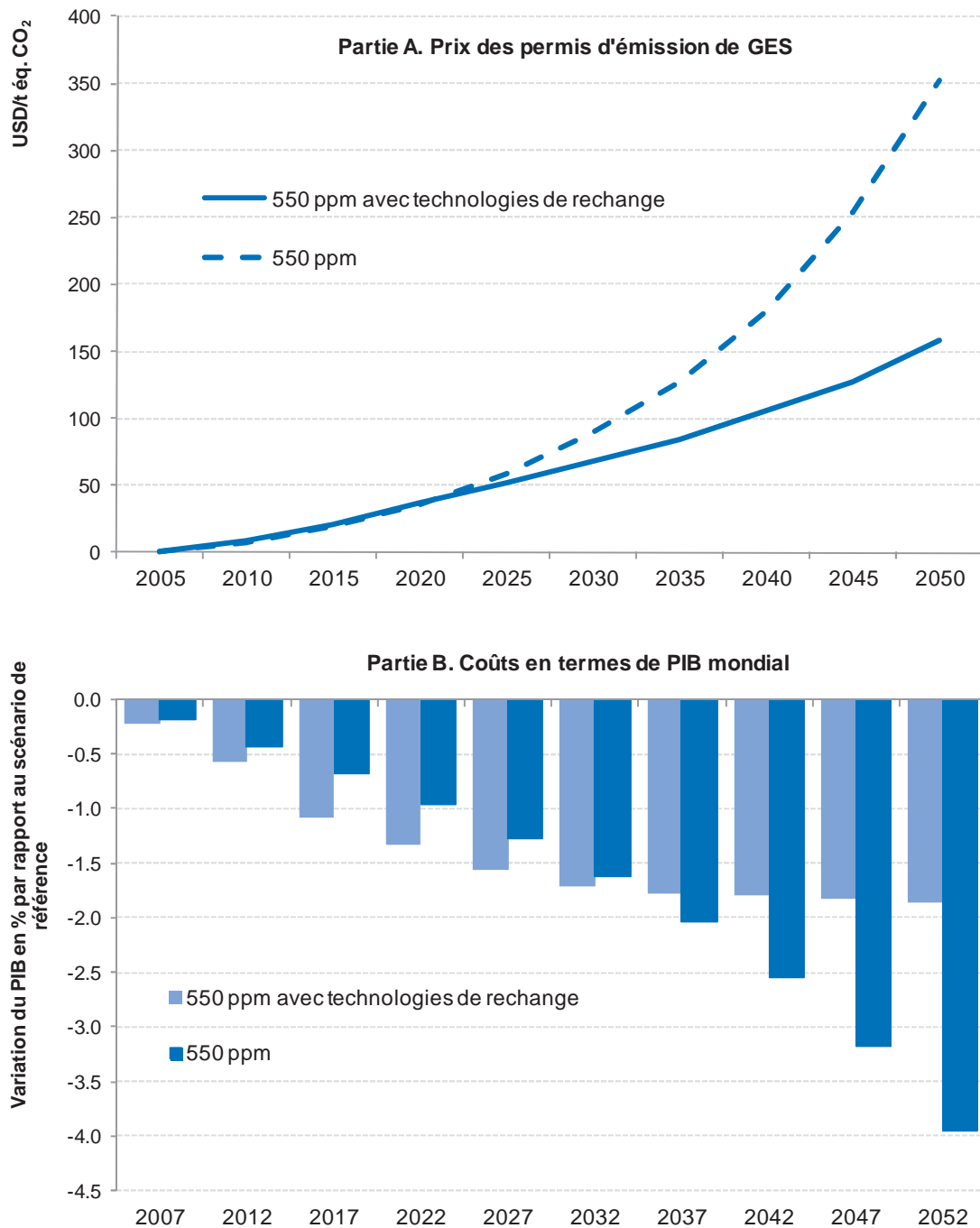
Source : Simulations sur modèle WITCH.

Par rapport à la section précédente, où l'objectif de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ était censé être atteint sans le concours de nouvelles technologies, celle-ci prévoit que les investissements en R-D liée aux technologies de recharge réduisent ceux consacrés à la R-D liée à l'efficacité énergétique. Par ailleurs, la technologie de recharge dans le secteur électrique diminue les besoins d'investissement dans la production d'électricité éolienne et solaire⁷. Toutefois, cela jouerait surtout dans la deuxième moitié du siècle, une fois l'application de la technologie de recharge devenue rentable. Durant les premières décennies, les investissements dans l'éolien et le solaire seraient en fait plus élevés que dans le scénario sans technologie de recharge dans le secteur électrique, du fait des limites imposées à l'électronucléaire et du délai nécessaire pour que cette technologie de recharge devienne compétitive (graphique 5.8).

D'après les estimations, l'investissement dans les technologies de recharge fait que la courbe que doit décrire le prix du carbone pour stabiliser la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ monte beaucoup moins haut et de façon nettement moins abrupte (graphique 5.9, partie A). Cependant, cela se vérifie essentiellement à des échéances relativement lointaines, puisque le prix du carbone évolue à peu près de la même façon avec et sans technologies de recharge jusqu'en 2025. Cela indique qu'indépendamment de la possibilité de mettre au point des technologies de recharge dans les secteurs électrique et non électrique, il faudra qu'un signal fort émane du prix du carbone au cours des prochaines décennies pour atteindre à moindre coût des objectifs rigoureux de baisse des émissions. Enfin, à plus longue échéance – et plus particulièrement après le milieu du siècle –, on prévoit que la disponibilité de technologies de recharge abaisserait sensiblement les coûts de réalisation de l'objectif de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ (graphique 5.9, partie B). Cela aurait toutefois pour contrepartie des pertes de PIB plus importantes au cours des prochaines décennies, en raison de l'importante augmentation des efforts de R-D qui serait nécessaire pour accroître la productivité des solutions de recharge.

Il apparaît que la technologie de recharge dans le secteur non électrique a davantage d'impact sur les coûts d'atténuation que la technologie de recharge dans le secteur électrique (graphique 5.10). Dans le cas de figure où seule la seconde est disponible, il ressort de la simulation que le coût de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ est légèrement plus élevé que dans l'hypothèse où aucune des deux n'est disponible. Cela ne tient qu'en partie aux restrictions présumées imposées à l'expansion de l'électronucléaire, puisque le relâchement de ces restrictions permet seulement d'aligner le coût de stabilisation sur celui du scénario sans aucune technologie de recharge. En revanche, plus le développement de l'énergie nucléaire et/ou la disponibilité de techniques de captage et de stockage du carbone sont limités, plus la recherche de nouvelles technologies de production d'électricité devient rentable. A l'inverse, dans le cas de figure où seule est disponible la technologie de recharge dans le secteur non électrique, le coût d'atténuation est fortement réduit et pas beaucoup plus élevé que le coût estimé en cas de disponibilité des deux technologies de recharge. Ces résultats mettent en lumière l'importance que revêt le développement de technologies sans carbone dans le secteur non électrique, où les possibilités de réduction des émissions offertes par les solutions aujourd'hui disponibles sur le marché sont moindres que dans le secteur électrique.

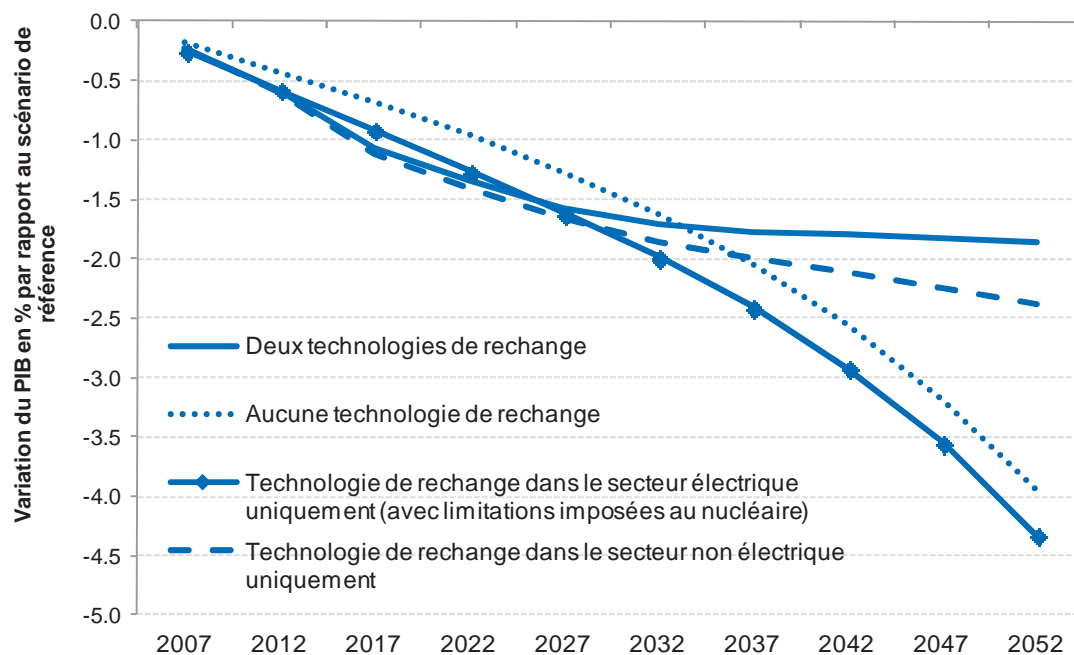
Graphique 5.9. Prévisions des coûts en termes de PIB mondial et des prix des émissions de GES dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂, avec et sans technologies de rechange



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

Graphique 5.10. Impact de la mise au point de solutions de recharge dans les secteurs électrique et non électrique sur les coûts en termes de PIB mondial dans le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations. En fait, le scénario de stabilisation de la concentration de GES à 550 ppm éq. CO₂ exposé ici est un scénario de stabilisation de la concentration du seul CO₂ à 450 ppm, et les prix des GES sont les prix du CO₂. La stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à environ 550 ppm éq. CO₂.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

5.2.4. Autres mesures d'encouragement de la R-D et du déploiement de technologies

Si elle crée bien des incitations en faveur de la R-D, la tarification des émissions de GES ne règle pas toutes les imperfections du marché qui entravent la R-D et le déploiement de technologies. Certaines de ces imperfections sont communes à tous les domaines de R-D, mais celles qui sont énoncées ci-après semblent être amplifiées dans le cadre de l'atténuation du changement climatique :

- L'écart entre le rendement social et le rendement privé attendus de la R-D et de l'adoption de technologies peut être accru par l'incertitude politique qui entoure l'action future en matière de climat, laquelle reflète à son tour l'absence de dispositifs crédibles en vertu desquels les gouvernements futurs seraient liés par les engagements de leurs prédécesseurs. Cette question est souvent moins sensible dans d'autres domaines de l'action des pouvoirs publics, soit parce que les échéances sont moins éloignées, soit parce que les modalités d'action sont mieux établies.
- Compte tenu des conséquences importantes en termes de bien-être que peut avoir toute percée technologique majeure – par exemple, dans le domaine de la production d'électricité –, la protection des droits de propriété intellectuelle peut ne pas représenter une assurance suffisamment crédible pour les investisseurs privés, qui peuvent être réticents à investir s'ils craignent que les gouvernements ne les privent *a posteriori* d'éventuelles rentes d'innovation essentielles⁸.

- Des défaillances du marché et des distorsions affectant les politiques qui sont propres au secteur de l'électricité peuvent expliquer la faiblesse des niveaux de R-D par rapport à d'autres secteurs. En particulier, les infrastructures existantes peuvent créer des effets de réseau qui peuvent constituer des barrières à l'entrée pour les nouvelles technologies. Ainsi, la plupart des réseaux nationaux ne se prêtent pas au raccordement de nombreux petits producteurs d'électricité d'origine renouvelable, et même des grands projets d'électricité renouvelable peuvent rencontrer des problèmes s'ils sont installés trop loin des réseaux existants⁹. Enfin, il se peut aussi que le manque de concurrence sur le marché et les distorsions telles que les subventions à l'énergie maintiennent les dépenses de R-D à un niveau faible¹⁰.
- Outre ces imperfections et distorsions, il est peu probable que les instruments fondés sur les prix couvrent l'ensemble des pays et/ou secteurs, au moins à moyen terme, ce qui accroît l'écart entre rendement social et rendement privé et milite en faveur d'une action des pouvoirs publics en matière de R-D à titre d'optimum de second rang.

Ces facteurs donnent à penser qu'il faut adopter des mesures spécifiques pour stimuler la R-D respectueuse du climat, en plus d'assurer un cadre global approprié pour l'innovation (pour des informations plus détaillées, voir OCDE, 2006c, et Jaumotte et Pain, 2005), de supprimer les subventions aux combustibles fossiles et d'accroître la concurrence sur les marchés de l'énergie¹¹. Outre les instruments classiques tels que la R-D publique et les subventions ou les aides en faveur de la recherche, on s'est de plus en plus intéressé ces dernières années à la possibilité de récompenser l'innovation au moyen de « prix de l'innovation » (encadré 5.2), qui échappent à certaines des limitations qui pèsent sur d'autres instruments (Newell et Wilson, 2005). Par ailleurs, une politique internationale en matière de R-D pourrait être justifiée, vu que l'atténuation du changement climatique est d'utilité mondiale et que les connaissances acquises grâce à la R-D peuvent avoir des retombées internationales. Ainsi pourrait-on envisager la création d'un fonds mondial chargé de faciliter les transferts de technologie et de récompenser l'innovation, par exemple par l'achat des brevets correspondants ou par d'autres mécanismes.

Encadré 5.2. Favoriser la R-D et l'innovation au moyen de prix d'encouragement

Les prix d'encouragement sont utilisés depuis longtemps pour récompenser l'innovation réussie et ils ont connu un regain d'intérêt ces dernières années, grâce notamment à des exemples très médiatisés dans les secteurs de l'espace et des vaccins¹. Ce type de récompense pourrait également être envisagé dans le domaine de l'atténuation du changement climatique, par exemple dans le cadre (ou en complément) des fonds mondiaux qui existent déjà ou sont sur le point d'être instaurés pour faciliter les transferts de technologie.

Les prix d'encouragement ont un certain nombre de caractéristiques qui en font des instruments d'action potentiellement utiles en matière de R-D. Contrairement aux aides et subventions, ils ne pâtissent pas du manque d'informations des pouvoirs publics concernant les rendements possibles de la R-D, en déplaçant le risque d'échec sur les chercheurs, ce qui peut être justifié dans le cas de la R-D appliquée (voir ci-dessous). En outre, les barrières administratives à l'entrée sont peu élevées et les risques de pressions exercées par des intérêts privés sont limités. En théorie, les prix d'encouragement peuvent accroître les dépenses de R-D à un coût plus bas pour les pouvoirs publics que les aides et subventions, et seraient même sans coût temporairement vu qu'ils ne sont payés qu'en cas de succès². Par rapport aux brevets, les prix d'encouragement sont en principe moins susceptibles de créer des distorsions pour autant que la valeur sociale de l'invention soit certaine et que les distorsions correspondant au financement des prix d'encouragement soient plus faibles que la perte de bien-être due au pouvoir monopolistique associé aux brevets (Wright, 1983).

Suite de l'encadré 5.2 page suivante

Encadré 5.2. Favoriser la R-D et l'innovation au moyen de prix d'encouragement

(suite)

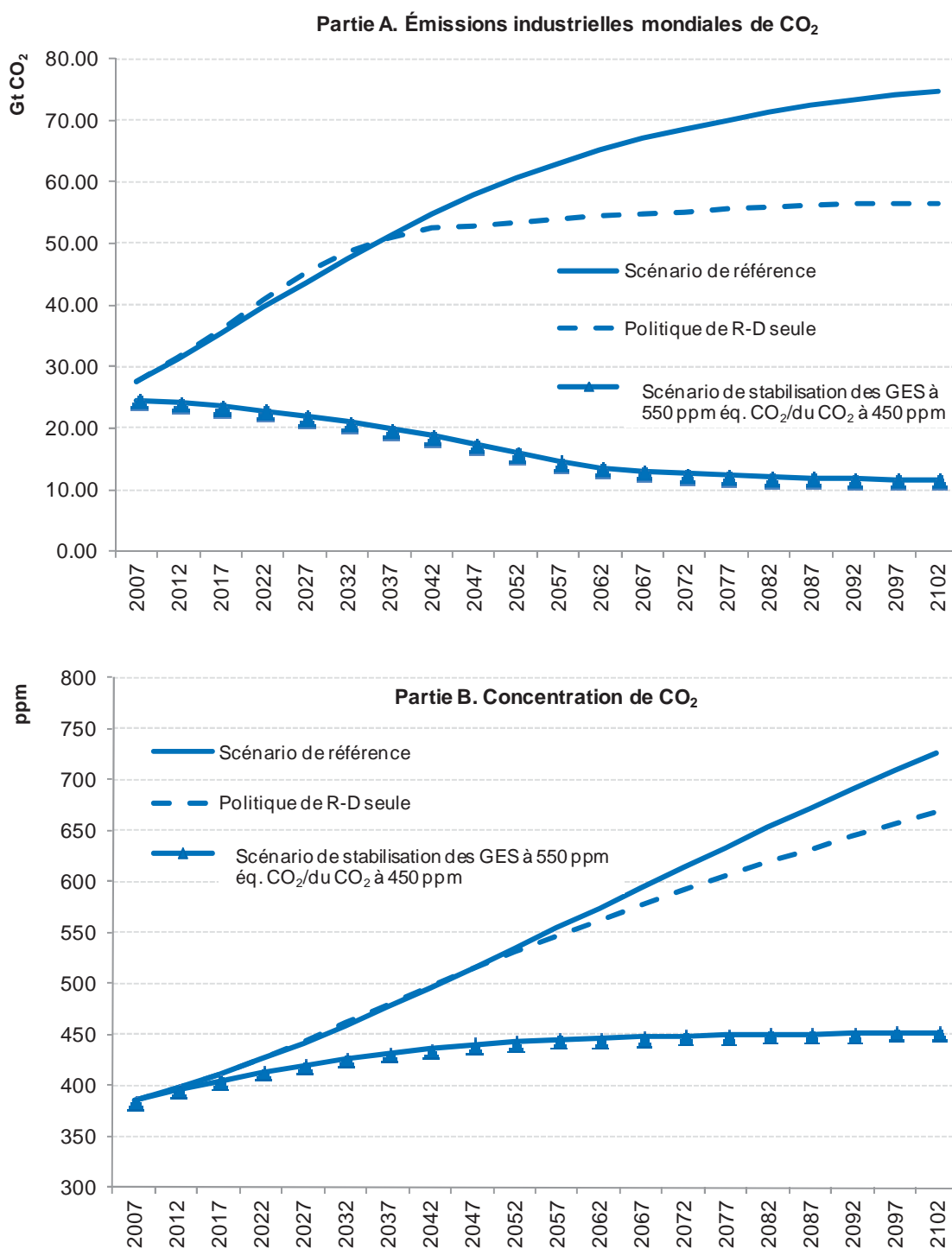
Les prix d'encouragement peuvent avoir plusieurs autres caractéristiques intéressantes dans l'optique de l'atténuation du changement climatique. La principale tient au fait qu'ils peuvent permettre d'atténuer l'incertitude politique qui entoure les prix du carbone futurs et l'éventuel manque de crédibilité des DPI, deux problèmes qui compromettent les incitations en faveur de la R-D. Par ailleurs, contrairement aux instruments d'action nationaux en matière de R-D, les prix d'encouragement internationaux répartiraient les risques et les récompenses entre les différents pays. Enfin, contrairement à d'autres instruments internationaux (par exemple, un fonds mondial pour la R-D attribuant des subventions dans les différents pays), ils peuvent éviter que les gouvernements nationaux se livrent une concurrence politique pour obtenir des financements de recherche.

Les prix d'encouragement ont toutefois un certain nombre d'inconvénients. En particulier, ils ont tendance à stimuler la R-D appliquée plutôt que fondamentale, pour au moins deux raisons (Newell et Wilson, 2005) : (1) la valeur sociale de l'innovation est plus difficile à déterminer à l'avance pour des percées technologiques majeures que pour des résultats technologiques particuliers, de sorte qu'il est plus compliqué de définir le niveau approprié du prix d'encouragement³ ; (2) l'asymétrie d'information – qui fait que les pouvoirs publics sont susceptibles d'être moins bien au courant des perspectives d'évolution des technologies que les chercheurs – et le risque qui en découle de voir des aides et subventions affectées aux mauvaises technologies peuvent être importants dans le cas de la R-D appliquée, alors qu'en recherche fondamentale, les incitations des gouvernements et des chercheurs ont tendance à mieux s'accorder, les seconds ayant des incitations à faire progresser la recherche fondamentale qui sont liées à leur carrière. Par ailleurs, comme les brevets, les prix d'encouragement peuvent impliquer des activités de recherche redondantes, même si ce risque peut être atténué, par exemple en présélectionnant les entreprises dans le cadre d'un processus en plusieurs étapes.

La conception des prix d'encouragement a également une grande importance pour les incitations en faveur de la R-D. Les pouvoirs publics peuvent améliorer la crédibilité de leurs engagements en mettant les fonds en réserve, ou en souscrivant une police d'assurance qui garantisse le paiement de la récompense en cas de succès. En outre, afin de limiter les incertitudes juridiques, il faut que les conditions d'attribution des prix soient définies avec précision, ce qui peut s'avérer plus simple pour des résultats techniques particuliers (par exemple, réalisations spécifiques dans les domaines des technologies de CSC, de la fission nucléaire, de la production d'électricité d'origine renouvelable ou des véhicules fonctionnant à l'hydrogène) que pour des avancées scientifiques plus générales. Le niveau du prix d'encouragement sera par ailleurs différent selon que l'objectif des pouvoirs publics est uniquement de stimuler la R-D ou également de favoriser les transferts de technologie. Dans le second cas, une solution peut consister à acheter par anticipation tout droit de brevet futur en prévoyant un prix plus élevé. Dans le même esprit, si les prix d'encouragement sont traditionnellement attribués en espèces, des garanties de marché (*advanced market commitments* : AMC) peuvent être utilisées pour encourager l'adoption quand il n'existe pas de marché privé pour l'invention, comme ce peut être le cas dans certains pays en développement qui n'appliquent pas de prix du carbone⁴. Les pays développés pourraient s'engager à l'avance à financer la mise en œuvre, dans les pays en développement, des technologies récompensées par des prix d'encouragement, ce qui stimulerait à la fois la R-D et les transferts de technologie.

1. Pour un examen approfondi des prix d'encouragement à l'innovation et des recommandations d'action concrètes en vue de développer leur application dans le contexte américain, y compris en faveur de l'atténuation du changement climatique, voir *National Research Council* (2007).
2. En présence d'un « ensemble commun » de connaissances, les prix d'encouragement (ou les brevets) qui récompensent les chercheurs dont les travaux ont abouti à hauteur du rendement social total de l'innovation entraîneraient des dépenses de recherche excessives, car les entreprises compétitives n'internalisent pas les effets négatifs de leurs propres dépenses sur la probabilité que d'autres entreprises fassent une découverte. Par conséquent, le prix d'encouragement nécessaire pour atteindre un niveau optimal de R-D est *inférieur* au rendement social total de l'innovation, et donc moindre que la subvention optimale en faveur de la R-D (voir en particulier Wright, 1983).
3. De ce point de vue, les brevets ont un avantage sur le plan de l'information, car leur valeur marchande tient compte des évolutions *ex post* imprévues du rendement de la recherche. Le montant du prix d'encouragement pourrait être optimisé en demandant aux concurrents eux-mêmes de le proposer (et en les laissant se livrer concurrence sur ce point), ce qui les obligerait à révéler leurs informations concernant les coûts et les rendements de la recherche (Che et Gale, 2003).
4. Pour des informations détaillées sur les garanties de marché dans le cas des vaccins, voir Kremer (2001a, 2001b).

Graphique 5.11. Prévisions des émissions et de la concentration de CO₂ dans l'hypothèse d'une politique mondiale de R-D appliquée seule



1. Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle utilisé pour cette analyse et donc pas prises en compte dans les simulations.

Source : Simulations sur modèle WITCH.

Même si cela reste à confirmer, les simulations sur modèle WITCH donnent à penser qu'un fonds mondial consacré à la R-D, avec pour objectif de subventionner la R-D et/ou le déploiement de technologies à faible émission de carbone, pourrait réduire encore les coûts d'atténuation s'il complétait un système de tarification du carbone. Toutefois, il apparaît que la taille optimale d'un tel fonds et ses effets sont très restreints, sauf si l'on suppose que les investissements de R-D dans de nouvelles technologies (de rechange) génèrent des retombées importantes au niveau international. Cela reflète en partie l'hypothèse retenue dans WITCH selon laquelle chaque région s'approprie presque entièrement le rendement social, si bien qu'il y a relativement peu de retombées internationales. De plus amples études concernant l'existence, la nature et l'ampleur des retombées internationales pourraient s'avérer nécessaires, ne serait-ce que pour étayer le débat en cours sur la valeur à attribuer aux efforts de certains pays pour augmenter la R-D et faciliter les transferts de technologie dans le cadre d'un accord global sur la politique climatique. De fait, d'un point de vue théorique, seul le rendement du soutien public à la R-D et au déploiement de technologies qui n'est pas conservé par le pays lui-même – c'est-à-dire les retombées *internationales* en termes de R-D et d'apprentissage – devrait être pris en compte dans le cadre d'un accord global.

En présence de retombées en termes d'apprentissage, par exemple d'effets liés à l'apprentissage par la pratique, la tarification du carbone et les mesures des pouvoirs publics en faveur de la R-D peuvent ne pas suffire pour assurer un déploiement approprié des technologies sobres en carbone existantes (voir, par exemple, Jaffe *et al.*, 2003, 2005). Ce peut être particulièrement le cas dans le secteur de l'électricité, où des effets de réseau et la nature cumulative du savoir compliquent le remplacement des technologies existantes. Par ailleurs, comme il n'y a au fond aucune différence entre l'électricité produite à partir de combustibles fossiles et celle produite à partir de sources d'énergie à faible émission de carbone, la demande commerciale d'énergie à faible intensité de carbone pourrait rester négligeable tant que cette dernière ne sera pas compétitive, ce qui freinera le processus d'apprentissage. Cela la différencie d'un certain nombre d'autres biens (biens informatiques ou électroniques de haute technologie, voitures, etc.), qui se caractérisent par l'existence de créneaux commerciaux pour de nouveaux produits coûteux (Stern, 2006, chapitre 16). Il a également été avancé que sans intervention des pouvoirs publics pour accélérer le déploiement de technologies à faible émission de carbone, il y a un risque de voir mis en place dans l'intervalle des systèmes énergétiques à forte intensité de carbone, sachant que d'importants investissements infrastructurels à long terme doivent avoir lieu au cours des prochaines années dans les secteurs de la production d'électricité, des transports et de la construction, en particulier dans les grands pays en développement (AIE, 2006, 2007c ; OCDE, 2008c).

Par ailleurs, le soutien public au déploiement des technologies existantes suscite un certain nombre de préoccupations, notamment en raison du risque d'installer durablement de mauvaises technologies (chapitre 2)¹². Au minimum, une stratégie de repli claire devrait être annoncée à l'avance, dans la mesure où un arrêt du soutien public peut déclencher une vive opposition. Enfin, il a été constaté, sur la base d'hypothèses plausibles concernant les taux d'apprentissage, que les subventions optimales étaient peu élevées (voir, par exemple, Fischer et Newell, 2007). Pourtant, la plupart des pays subventionnent déjà fortement l'électricité d'origine renouvelable, avec des prix implicites par tonne d'émissions de CO₂ évitées qui dépassent parfois 250 EUR dans le cas de l'éolien et 1 000 EUR dans celui du photovoltaïque (OCDE, 2004). La justification de mesures nationales supplémentaires semble donc plutôt limitée.

5.2.5. *L'investissement dans la R-D peut-il donner des résultats en l'absence de tarification du carbone ?*

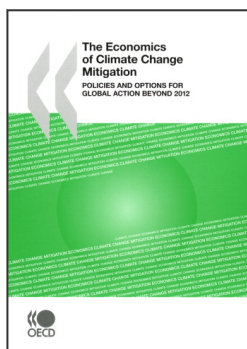
Une autre question essentielle qui se pose aux gouvernements est de savoir si, et à quel coût, des dépenses de R-D plus élevées suffiraient à elles seules à faire face au changement climatique en l'absence de tarification du carbone. Il ressort des simulations réalisées sur le modèle WITCH que, quelle

que soit leur ampleur, les dépenses mondiales consacrées à la R-D liée à l'énergie ne permettront pas *seules* de lutter contre le changement climatique. Même si elles atteignaient un niveau improbable, par exemple 1 pour cent du PIB mondial, soit 30 fois leur niveau actuel, elles n'auraient que peu d'effet. Cela s'explique par le fait que les évolutions vers une production et une consommation moins émettrices de carbone qui découleraient de la tarification du carbone au cours des premières décennies n'auraient pas lieu, ainsi que par les délais nécessaires pour que les nouvelles technologies se positionnent sur le marché¹³. Le graphique 5.11 illustre ce résultat, en prenant pour hypothèse qu'un fonds mondial est progressivement mis en place en faveur de la R-D au cours des prochaines décennies et qu'il distribue à terme 0.08 % du PIB mondial par an, un montant à peu près comparable au pic que les dépenses publiques de R-D liée à l'énergie ont enregistré au début des années 80 dans les pays de l'OCDE. Trois hypothèses optimistes concernant l'utilisation des ressources du fonds ont été posées : i) les investissements de R-D liés aux deux technologies de recharge dans les secteurs électrique et non électrique sont subventionnés (section 5.3.1) ; ii) ces dépenses ne se font pas au détriment des investissements nationaux de R-D (en réalité, il se peut que les pays réduisent leurs propres dépenses de R-D si des subventions importantes sont reçues d'un fonds international et/ou versées par ailleurs) ; et iii) le fonds est financé grâce à une taxe forfaitaire, c'est-à-dire que les distorsions éventuelles découlant de la collecte de fonds sont ignorées. Même dans ces conditions favorables, il apparaît que cette politique de R-D mondiale schématisée permet tout au plus de stabiliser les émissions mondiales à plus du double de leur niveau actuel au milieu du siècle (graphique 5.11, partie A)¹⁴. La concentration de CO₂ augmente donc de manière continue et atteint à la fin du siècle un niveau qui est inférieur de seulement 50 ppm environ à celui du scénario de référence (graphique 5.11, partie B). En définitive, il apparaît qu'il n'est pas possible de stabiliser les concentrations au cours de ce siècle uniquement au moyen d'une politique mondiale de R-D, quelle que soit son envergure.

Notes

1. Les technologies émergentes sont entre autres : pour la production d'électricité, l'éolien et le solaire, l'énergie nucléaire de prochaine génération ou les techniques de captage et de stockage du carbone (CSC) ; pour les transports, les biocarburants avancés et les véhicules électriques et à pile à hydrogène ; pour l'industrie, les technologies de CSC et un ensemble de technologies énergétiques industrielles permettant d'améliorer le rendement énergétique et de réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles ; pour les bâtiments et les appareils, une série d'améliorations (essentiellement) progressives des techniques d'isolation, des systèmes d'éclairage et de refroidissement ou de la sobriété énergétique des équipements (AIE, 2008b).
2. Le fait de disposer d'un large éventail d'options technologiques peu coûteuses permettrait non seulement de réduire les coûts d'atténuation futurs, mais aussi leur sensibilité aux objectifs de réduction des émissions. Cela fournirait une certaine couverture contre le risque de devoir faire plus d'efforts que prévu pour lutter contre le changement climatique (Stern, 2007, chapitre 16).
3. Les dépenses de R-D en pour cent du chiffre d'affaires total étaient environ huit fois moins élevées dans le secteur de la production d'électricité que dans le secteur manufacturier dans son ensemble. Ce résultat est cohérent avec celui d'une analyse sectorielle détaillée concernant les États-Unis (Alic *et al.*, 2003).
4. Pour une comparaison des incitations en faveur de la R-D et du déploiement de technologies créées par différents instruments de réduction des émissions de GES, voir le chapitre 2.
5. Il a été démontré que les hypothèses technologiques étaient un déterminant important des différences entre les coûts de l'atténuation en termes de PIB et de bien-être qui sont cités dans les études disponibles (Barker *et al.*, 2002, 2006 ; Fischer et Morgenstern, 2006). Pour une vue

- d'ensemble des modèles récents qui font intervenir les changements technologiques induits, voir Edenhofer *et al.* (2006).
6. Il s'agit de la trajectoire optimale du prix mondial du carbone dans le scénario de non-coopération du modèle, avec un objectif de concentration de CO₂ à long terme fixé à 450 ppm (pour plus de détails, voir l'encadré 5.1 et Bosetti *et al.*, 2009a). Les émissions de GES autres que le CO₂ ne sont pas couvertes par le modèle WITCH et ne sont donc pas prises en compte dans les simulations. Cependant, la stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm correspond grosso modo à la stabilisation de celle de l'ensemble des GES à 550 ppm éq. CO₂.
 7. Par définition, l'effet d'éviction s'exerce également sur les investissements dans la production électronucléaire dans les simulations.
 8. Ce type de préoccupation a été mis en avant pour expliquer le niveau relativement faible de la recherche privée axée sur la mise au point de vaccins contre les grandes maladies planétaires comme le paludisme, la tuberculose ou le VIH (Kremer, 2001a, 2001b).
 9. Il existe aussi des effets de réseau dans le transport routier, où l'accroissement de la pénétration de technologies sobres en carbone (par exemple, véhicules électriques ou à pile à hydrogène, biocarburants) nécessitera sans doute de nouvelles infrastructures, car celles qui sont en place (stations-service, etc.) ont été conçues pour les technologies fossiles.
 10. La nature cumulative du savoir peut également accroître l'incertitude quant au rendement de la R-D. Cela est dû au fait qu'en définitive la pénétration de toute innovation révolutionnaire repose de manière plus cruciale que dans d'autres secteurs sur une série d'innovations supplémentaires et de gains d'apprentissage progressifs, qui sont très difficiles à prévoir (voir, par exemple, Stern, 2007, chapitre 16).
 11. Par exemple, à partir d'un modèle théorique fondé sur les données du secteur de l'électricité aux États-Unis, on a déterminé qu'en présence de subventions optimales en faveur de la R-D et des énergies renouvelables, le prix des émissions de CO₂ nécessaire pour aboutir à une réduction de 5 % des émissions du secteur américain de l'électricité pourrait baisser de plus d'un tiers, et le coût global du train de mesures pourrait être ramené à zéro grâce aux retombées positives générées par les mesures de soutien à la technologie (Fischer et Newell, 2007).
 12. Voir l'analyse présentée dans Jaffe *et al.* (2003).
 13. Dans le cadre d'une étude portant uniquement sur le secteur de l'électricité, Fischer et Newell (2007) sont parvenus à la conclusion que les mesures de soutien à la technologie étaient les plus coûteuses de toutes les mesures d'atténuation, car (i) elles ne tirent pas profit des possibilités de réduction des émissions à moindres frais qui existent déjà aujourd'hui, et (ii) il faut du temps et des investissements pour que de nouvelles technologies deviennent disponibles.
 14. Ces résultats sont cohérents sur le plan qualitatif avec des études antérieures (voir, par exemple, Buchner et Carraro, 2005).



Extrait de :

The Economics of Climate Change Mitigation Policies and Options for Global Action beyond 2012

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/9789264073616-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2010), « Politiques technologiques et de R-D », dans *The Economics of Climate Change Mitigation : Policies and Options for Global Action beyond 2012*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264073913-7-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.