

Copenhague 2009 : Incertitudes et Prix du Carbone

Christian Gollier, Toulouse School of Economics (LERN, IDEI)

19 Juin 2009

1. Introduction

« L'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est *très probablement* attribuable à la hausse des concentrations de gaz à effet de serre (GES) anthropiques. » (GIEC, 2007) Cette phrase cruciale contenue dans le quatrième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) illustre les importants progrès qui ont été accomplis essentiellement depuis 20 ans pour mieux appréhender le problème probablement le plus important résultant de l'intervention de l'homme sur son environnement. Alors que la concentration de CO₂ était limitée à 280 parts par million (ppm) avant la révolution industrielle, elle est montée à 380 ppm en 2005. A cette date, chaque être humain émettait en moyenne 4,6 tonnes de CO₂ (tCO₂) par an, pour une émission totale d'environ 27 Gigatonnes.¹ Cette consommation est très hétérogène selon le niveau de développement et les habitudes de consommation. Elle atteint par exemple plus de 18 tCO₂ aux USA. Si rien n'est fait d'ici là, cette concentration atteindra 700 ppm en 2100, et elle augmenterait probablement la température moyenne de la Terre d'environ 4°C. Telles sont les connaissances actuelles sur le changement climatique.

Cet input des sciences du climat interpelle de façon insistante la science économique pour dépasser la phase d'évaluation des impacts environnementaux en vue de l'élaboration d'une politique effective de lutte contre l'effet de serre. A quelques mois du rendez-vous de Copenhague, il est utile de faire le point sur les deux grandes questions, l'une normative, l'autre positive, que tentent de résoudre les économistes dans ce domaine. Premièrement, quel est le niveau désirable de réduction des émissions de GES, maintenant et à l'avenir ? Deuxièmement, comment mettre en œuvre cette réduction des émissions de manière à atteindre l'objectif écologique fixé au moindre coût social ?

Le rapport de Jean Tirole aborde essentiellement la question positive de la décentralisation de la politique efficace. Les économistes connaissent depuis longtemps le challenge que posent les externalités dans l'efficacité de l'allocation des ressources. Un système de taxe ou de marché de permis d'émission permet théoriquement de réconcilier décentralisation et efficacité. Mais cette réconciliation nécessite l'existence d'une autorité supérieure capable d'imposer le mécanisme économique adéquat à toutes les sources, ce qui n'est pas le cas des externalités globales en général, et du changement climatique en particulier. Malgré tout, il faut tout faire pour tenter de se rapprocher de la règle du prix unique, de manière à ce que le coût marginal de la tonne de CO₂ évitée soit le même dans tous les secteurs, pour tous les projets, dans toutes les zones géographiques de notre planète. Cette vérité rappelée par Jean Tirole est basée sur un argument trivial et robuste. Par contradiction, si tel n'était pas le cas, si le coût marginal était par exemple de 100 dans le secteur/pays A et 50 dans le secteur/pays B, alors la réallocation de l'effort de réduction des émissions de A vers B est efficace. En particulier, si les coûts marginaux sont constants, le transfert total de l'effort de A à B permettrait de diviser par deux le coût social pour un même objectif écologique. Finalement,

¹ Une tonne de CO₂ équivaut à 0,27 tonne de carbone (unité plus souvent utilisée aux USA). Une tonne de CO₂ est émise en roulant en voiture pendant environ 4 000 kilomètres. La consommation annuelle d'électricité d'un ménage moyen émet 11 tonnes de CO₂ si elle est générée par combustion de charbon.

dans ce contexte, il existe un transfert qui rend cette réallocation gagnant-gagnant, c'est-à-dire Pareto-supérieure. On peut au contraire estimer la perte d'efficacité d'un mécanisme n'englobant que certains secteurs, ou certains pays, ou encore plus généralement qui autoriserait des prix du carbone hétérogènes. Ainsi, Nordhaus (2008, p.121) estime que si on limitait la participation aux cinq pays les plus émetteurs (USA, Chine, Russie, Inde et Allemagne), qui ne couvrirait donc qu'un peu moins de la moitié des émissions, le coût social de la lutte contre le changement climatique (à objectif écologique inchangé) serait multiplié par un facteur 3. Si on y ajoute les autres pays de l'Europe de l'Ouest, ce facteur s'abaisse à 2,3.

Cette règle du prix ou coût marginal unique s'applique aussi entre secteurs économiques. Comme on l'a vu par exemple en France dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, la tentation des politiques et bureaucrates est grande de chercher à planifier l'allocation des efforts en assignant à chaque secteur – voire à chaque source -- un objectif de réduction d'émission. Cette stratégie « Command & Control » a l'avantage en effet de mettre en valeur l'action publique et le rôle du politique. L'imposition de normes d'isolation dans l'immobilier ou de consommation au kilomètre parcouru dans le transport ne garantit pas l'optimalité sociale, en particulier au vu du faible développement de l'évaluation économique dans notre pays (sauf dans quelques secteurs comme l'énergie ou dans certains ministères). Il en est de même pour les politiques volontaristes de subvention, comme pour les biocarburants où l'électricité d'origine éolienne ou photovoltaïque.² A cet égard, la mission climat de la Caisse des Dépôts avait calculé que le coût de la t/CO₂ évitée en France par la politique d'aide actuelle aux énergies renouvelable était de l'ordre de 22 euros environ pour l'éolien à plus de 600 pour le solaire. Par ailleurs, l'étude d'impact du Grenelle de l'environnement a systématiquement calculé un coût à la tonne de carbone évité pour les différents types de mesures. Les fourchettes qui émergent sont les suivantes : 130-190 euros pour les mesures concernant la construction neuve et la rénovation thermique, avec cependant des coûts moindres pour les HLM (15-80) et certains logements ou bureaux (40-240) ; 100 € pour le bonus-malus ; 35 € pour la filière bois...

Lors du Conseil Européen de mars 2007, il fut décidé un objectif de 20% du mix énergétique d'origine renouvelable d'ici 2020, et une obligation d'au moins 10% de biocarburant incorporés dans les carburants pour le transport au même horizon. Que savons-nous de l'efficacité sociale de ces objectifs contraignants ? Ces politiques ne se justifient que si les acteurs doutent de la crédibilité des Etats à imposer un prix au carbone sur le long terme, et ne constitue au mieux qu'une solution de second rang.

La très connue étude de 2007 réalisée par McKinsey, actualisée en 2009, évalue la courbe de coût marginal de réduction des émissions pour l'ensemble de la planète d'ici à 2030. Plusieurs centaines d'actions ont été évaluées. La Figure 1 reproduit cette courbe sur sa partie inférieure à 60 euros par tCO₂. Ainsi par exemple, si l'on en croit cette étude, le développement du nucléaire d'ici à 2030 permettrait de réduire les émissions de 1 GtCO₂ par an à un coût marginal de 10 euros/tCO₂ par an. Notons que plus de 10 GtCO₂ d'émission annuelle sont éliminables avec un coût financier net négatif ou nul. A ce stade, ce travail a bien sûr une valeur plus indicative que réellement opérationnelle. Il a le grand avantage de donner des indications sur l'ordre de mérite des actions possibles en faveur du climat, ainsi que sur le coût global d'abattement en fonction de l'objectif de réduction.

² En France, les particuliers sont incités à investir dans l'énergie photovoltaïque à travers une obligation de rachat par EDF de l'électricité solaire au prix de 55 c€/kWh. Pour rappel, le coût de l'électricité nucléaire en France est estimée à 4 c€/kWh.

Exhibit 1

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030

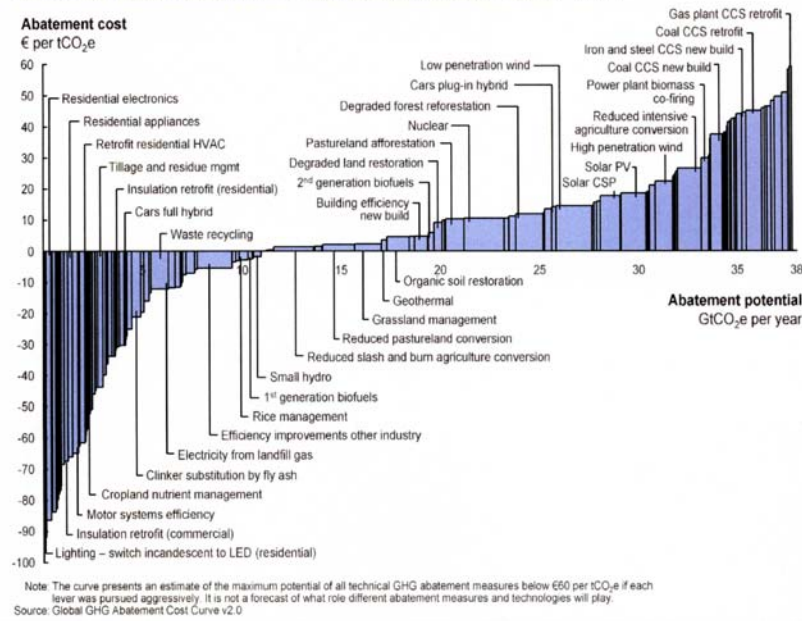


Figure 1 : L'étude de McKinsey (2009)

La règle du prix unique doit être clairement le fil conducteur de toute politique de lutte contre le changement climatique. Son intérêt est d'optimiser la politique climatique en rationalisant les efforts des acteurs économiques, en mobilisant tous les gisements d'abattement de coût inférieur à son taux. Il reste à en déterminer le niveau. Cette valeur carbone a en effet non seulement la vocation de coordonner les efforts individuels, mais aussi celle de déterminer l'intensité de l'effort collectif. Une valeur élevée rend beaucoup de projets profitables, et augmente en conséquence l'effort global en faveur du climat. En fait, ce prix détermine le seuil critique de coût marginal qui sépare les projets socialement désirables de ceux dont la mise en œuvre réduirait le bien-être collectif. Sa détermination fait l'objet d'intenses débats parmi les économistes. Dans cette note, je présente mon point de vue sur l'état de ce débat, et j'apporte quelques éclairages sur des questions spécifiques. Par exemple, faut-il moduler l'effort collectif selon la conjoncture économique ? Faut-il faire croître la valeur carbone dans le temps ? Comment cette valeur carbone d'aujourd'hui dépend-elle des anticipations des bénéfices attendus des efforts de R&D sur les coûts futurs d'abattement ? Comment pondérer les bénéfices futurs avec les coûts présents ? Pour répondre à ces questions, j'adopte ici une approche purement normative, sauf exceptions clairement spécifiées dans le texte.

Un mot sur le prix observé du CO₂ sur le marché européen des permis d'émission (ETS). Ce prix est déterminé par la quantité de permis mis sur le marché par les Etats. Il est donc l'expression de la rareté relative imposée par les institutions politiques européennes, et n'a pas de relation directe avec les dommages futurs générés par l'augmentation de la concentration de GES. Ce marché n'a donc pas vocation à révéler la valeur socialement désirable du carbone. Au contraire, l'institut émetteur des permis devrait moduler dans le temps l'offre de manière à atteindre un prix d'équilibre en ligne avec la valeur carbone estimée par les modèles intégrés.

2. Incertitude sur la mesure des dommages anticipés

Une autre règle de base de la science économique qui s'applique dans cette thématique du changement climatique est l'égalisation du coût marginal d'abattement avec son bénéfice marginal. Ce bénéfice marginal prend la forme de la réduction des dommages que la tonne de CO₂ éliminée va permettre d'éviter. Pour vérifier cette affirmation, supposons par contradiction que le coût de la dernière tonne de CO₂ évitée soit égal à 20 euros, mais que le dommage marginal produit par la dernière tonne de GES soit égal à 60 euros. Dans ce cas, un effort de réduction d'une tonne supplémentaire a un bénéfice social net de $60-20=40$ euros. Tant que le dommage marginal excède le coût marginal d'abattement, accroître l'effort augmente le bien-être collectif. On arrive à l'optimum social lorsque l'égalisation se produit. Cette règle d'efficience est cruciale et robuste.

Sa mise en œuvre est rendue difficile par la complexité du calcul du dommage marginal, et par la multiplicité des sources d'incertitude qui affectent ce dommage. L'augmentation de la concentration de GES augmente la température moyenne de la terre, sans doute de façon différente selon la région. L'intensité de cette relation reste encore aujourd'hui incertaine. Par ailleurs, l'impact du changement climatique sur les équilibres écologiques et économiques est encore plus radicalement incertain. L'incertitude porte aussi sur la valeur que nous accorderons à l'avenir aux actifs environnementaux, comme la biodiversité par exemple. Finalement, on ne sait trop qu'espérer des progrès scientifiques et technologiques pour permettre une meilleure adaptation aux chocs climatiques anticipés, ou pour réduire les émissions de GES à moindre coût. Bref, le dommage marginal généré par tonne de CO₂ émise aujourd'hui dans l'atmosphère est sujette à une incertitude assez radicale. C'est pourquoi l'économie du changement climatique constitue certainement le plus grand challenge de la théorie de la décision en incertitude.

Sans surprise, cette incertitude se reflète dans la détermination de la valeur carbone. Dans son étude reprenant la littérature dans des revues à comité de lecture, Tol (2005) obtient une valeur de 12 \$ comme estimation moyenne du dommage marginal de la tonne de CO₂ émise. Mais Tol relève aussi l'étendue considérable de ces estimations, certaines études obtenant des dommages marginaux négatifs³, alors que d'autres conduisent à des valeurs très élevées, pouvant atteindre 500 \$/tCO₂. Le rapport Stern (2007), qui n'avait pas comme objectif de produire une telle valeur, offre néanmoins une estimation à 85 \$/tCO₂ de 2007. Quant à Nordhaus (2008), il propose au contraire une valeur carbone de 8 \$/tCO₂, ce qui revient à 2.4 centimes par litre d'essence.

Peu d'analyses économiques intègrent l'incertitude dans l'estimation des dommages dus au changement climatique. Le rapport Stern, qui est basé essentiellement sur l'utilisation du modèle PAGE de Chris Hope (2006), constitue une exception marquante. Ce modèle utilise une approche de Monte-Carlo intégrant un grand nombre d'incertitudes, dont l'impact économique d'une augmentation de la température au-delà de 2.5 °C. La Figure 2 décrit l'évolution du dommage net moyen sur les 200 prochaines années, dans le cadre de son scénario pessimiste intégrant des dommages non-économiques. Si rien n'est fait, le dommage agrégé espéré est de 0.4% du PIB mondial en 2060, 2.9% en 2100, et 13.8% en 2200. En 2200, il y a 5 chances sur 100 que le dommage soit supérieur à 35% du PIB mondial !

³ Certaines études relèvent en particulier que certains pays comme les USA, la Russie ou les pays scandinaves pourraient tirer un bénéfice net positif à une hausse modérée de 2 ou 3 degrés Celsius.

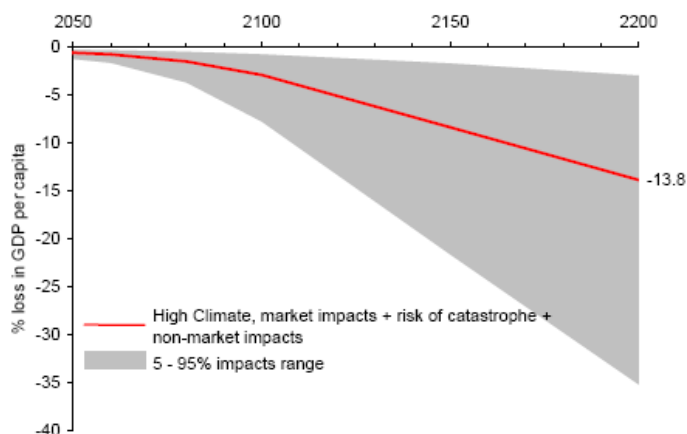


Figure 2: L'estimation des dommages dans le rapport Stern.

Le rapport Stern a reçu un accueil qui pourrait être qualifié de triomphal en France, à contrepieds de l'attitude de la plupart des économistes américains par exemple. Pourtant, le rapport Stern est beaucoup plus pessimiste que les rapports scientifiques internationaux antérieurs sur la question, sur lesquels un certain consensus favorable existait en France. Par exemple, William Nordhaus (2008) a estimé qu'en l'absence de politique globale de lutte contre le changement climatique, la hausse de la température moyenne de la terre sera de 5,3 °C en 2200, ce qui impliquera un dommage net d'environ 7% du PIB mondial à cette date. Mais comme Nordhaus utilise un taux d'actualisation plus élevé que Stern, le dommage équivalent immédiat et permanent n'est que de 3% du PIB mondial, contre jusqu'à 20% pour Stern. Il considère de plus que ce rapport doit être considéré comme un document plus « politique que scientifique ». Il critique essentiellement le choix d'un « taux d'actualisation quasi nul », qui gouverne la conclusion, sujet sur lequel je reviendrai dans la section 3. Mendelsohn (2007) considère que Nicholas Stern a un biais catastrophiste dans le choix de ses hypothèses en prenant systématiquement celles qui sont les plus favorables à la stratégie de l'action. Il conclut que « l'analyse nécessite d'être construite sur des bases scientifiques et économiques solides avant que des centaines de milliards de dollars ne soient investis dans la réduction des émissions ».

Weitzman (2009) considère que Stern a « probablement raison, mais pour de mauvaises raisons ». Stern obtient une valeur carbone élevée en prenant un taux d'actualisation faible, mais en ne tenant pas vraiment compte d'événements extrêmes pouvant remettre en cause l'existence même de l'homme sur la terre. La critique peut paraître surprenante, précisément parce que Stern fait figure de pionnier en intégrant le risque et l'aversion au risque dans son évaluation. Mais d'après Weitzman, il le fait de façon classique, en prenant une aversion au risque faible, et en sous-estimant le risque, en particulier en sous-estimant la probabilité d'événements extrêmes.

L'approche classique du risque en économie consiste à intégrer une prime de risque à l'évaluation des actions qui réduisent les risques portés par les parties prenantes. Cette prime de risque dépend du degré d'aversion au risque de ces parties. Pour estimer ce degré d'aversion au risque, faisons le petit test suivant : combien serions-nous prêts à payer pour éliminer le risque de gagner ou perdre 10% de notre richesse avec égales probabilités ? On normalise l'indice d'aversion relative au risque notée γ en imputant la valeur $\gamma=1$ à l'agent qui répond qu'il est prêt à payer un demi pourcent de sa richesse pour éliminer ce risque. Ainsi, pour la réponse plus réaliste de 2%, on aura une aversion relative de 4. Barsky et al. (1997) utilisent cette méthodologie à partir de données d'enquête américaine et obtiennent les

résultats suivants : le degré d'aversion au risque médian est égal à 7. Cinq pourcents de la population ont une aversion relative au risque supérieure à 33, et 5 pourcents ont une aversion au risque inférieure à 1.3.

Stern suppose de façon un peu surprenante un indice d'aversion au risque unitaire. Dans ce cas, l'approximation d'Arrow-Pratt indique alors que cette prime, exprimée en % de PIB, est égale à la moitié de la variance de la perte effective, elle aussi exprimée en % du PIB. A partir de la Figure 2, on peut grossièrement estimer l'écart-type de la perte en 2200 à 10%. La prise en compte de l'incertitude dans le rapport Stern conduit donc à une prime de risque de $0.5 \cdot (10\%)^2 = 0.5\%$. Ainsi, l'incertitude en 2200 équivaut à substituer une perte anticipée de 13.8% du PIB mondial à une perte corrigée pour le risque de 14.3%.⁴ « Tout ça pour ça ? », pourrait-on se dire ! Weitzman (2009) s'oppose à cette analyse, et explique combien ce calcul est basé sur des hypothèses discutables. En effet, la formule d'Arrow-Pratt est basée sur une hypothèse implicite de normalité des risques encourus. L'hypothèse de loi normale présuppose elle-même par exemple que la probabilité que la perte excède la moyenne plus deux fois l'écart-type n'est que de 5%. Dans le cas du changement climatique, il est peu probable que cette hypothèse soit vérifiée. Plus spécifiquement, beaucoup de scientifiques suggèrent une distribution très asymétrique des dommages, avec des événements catastrophiques de très faible probabilité.

La question de la prise en compte du risque dans la détermination de la valeur carbone doit donc être examinée sous un angle assez différent des approches classiques en finance ou en macroéconomie où l'hypothèse de normalité est un peu plus raisonnable.⁵ La bonne question à se poser serait de savoir ce que nous serions collectivement prêts à payer pour éliminer le risque, même avec une infime probabilité, d'un collapsus économique, d'un retour à l'âge de pierre, voire de l'extinction de l'humanité.⁶ Supposons le cas de l'annonce d'un risque de collision d'une météorite avec la terre dans 20 ans, cet événement conduisant à l'anéantissement de toute forme de vie sur notre planète. Supposons de plus qu'il existe une technologie permettant d'éliminer ce risque, mais qu'elle nécessite de sacrifier une part x du PIB mondial pendant les 20 prochaines années. Quelle est la valeur maximale de ce sacrifice x en fonction de la probabilité p de collision ? Pour Weitzman (2009), nous devrions être prêts à tout sacrifier pour sauver cette humanité, quelque soit la probabilité p décrivant la vraisemblance de cette collision, dès lors qu'elle est non nulle.⁷ Cet argument appliqué au changement climatique conduirait à recommander l'élimination très rapide de toute émission de GES, et le choix d'une valeur quasi infinie au carbone.

Je ne pense pas que l'argument de Weitzman, qui s'apparente à une interprétation catastrophiste du principe de précaution, soit très convainquant, pour les raisons suivantes. Premièrement, il existe d'autres périls globaux – réels ou fantasmés -- avec un risque d'extinction de l'humanité, tels que les pandémies, l'hiver nucléaire, ou la catastrophe écologique due à une innovation bio-technologique incontrôlée par exemple. Outre l'impossibilité de classer par ordre de mérite les politiques publiques sous une telle hypothèse

⁴ Gollier (2007a) examine cet aspect du rapport Stern plus en détail.

⁵ La théorie de la finance souffre aussi de cet excès de référence à l'hypothèse de normalité. Certains articles récents, dont Barro (2009), suggèrent que la prise en compte d'événements extrêmes, tels que ceux révélés par la crise financière actuelle, permet d'expliquer le paradoxe de la prime de risque. Le paradoxe de la prime de risque est de même nature que l'observation que la prise en compte du risque dans le rapport Stern a un effet complètement marginal sur l'analyse coût-bénéfice.

⁶ Sur le degré de réalité de tels scénarios, voir Diamond (2005), qui étudie le destin de certaines civilisations disparues par le fait de la mauvaise gestion des biens communs.

⁷ C'est une conséquence de l'hypothèse de constance de l'aversion relative au risque.

et la domination de ces risques extrêmes dans l'analyse des politiques économiques, cette approche conduirait très sûrement à une très forte décroissance au niveau mondial, avec des conséquences probablement encore plus apocalyptiques que les maux que ces politiques sont sensées traiter. Deuxièmement, l'observation des comportements individuels indiquent une propension à payer relativement faible pour prévenir de tels risques au niveau individuel. Nous sommes tous confrontés au risque d'effondrement individuel, comme le décès. Nous pouvons réduire ce risque de multiples façons, comme par l'achat et l'entretien d'un véhicule plus sûr, par une alimentation plus saine, l'abandon du téléphone portable, ou l'exercice fréquent d'un sport par exemple. L'observation est que nous ne sacrifions rarement plus qu'une fraction marginale de notre budget ou de notre temps à ce type d'investissement coûteux. Nous faisons tous les jours des arbitrages entre consommation et prévention de risques catastrophiques. La valeur que nous accordons à notre propre vie n'est donc pas infinie.

Il est néanmoins incontestable que la prise en compte des événements extrêmes dans le calcul économique mérite un traitement plus adapté dont les éléments tant scientifiques qu'opérationnels restent encore à fixer. Il est possible que ce traitement joue un rôle crucial à l'avenir pour fixer la valeur carbone. Ce texte n'a pas vocation à décrire cette théorie en formation. Elle nécessite de préciser la manière d'évaluer le niveau de bien-être collectif à des niveaux extrêmes de détérioration du niveau de vie, ainsi que la manière de pondérer dans l'analyse globale les probabilités des événements très peu probables.

Le problème du traitement des queues de distribution épaisses n'est pas très éloigné du principe de précaution, dont le contexte d'application est l'imprécision des probabilités. Lorsqu'il est difficile de quantifier de façon précise la distribution du risque, par exemple parce que la valeur de certains paramètres des modèles intégrés climato-économiques sont inconnus, les queues de distribution deviennent naturellement épaisses.⁸ De plus, l'ambiguïté des probabilités mérite aussi un traitement particulier dans l'analyse. En effet, comme le montre le jeu d'Ellsberg, les individus ne perçoivent pas de la même façon un risque de perte de 10% avec une probabilité $\frac{1}{2}$ et un risque de perte de 10% avec une probabilité inconnue d'espérance $\frac{1}{2}$.

3. Désaccords sur l'actualisation

Comme l'essentiel des dommages liés à l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère se produiront dans un avenir lointain, le traitement du temps dans l'évaluation économique du changement climatique fait l'objet d'une violente controverse depuis de nombreuses années, et celle-ci s'est intensifiée depuis la publication du rapport Stern. Dans ce dernier, un taux d'actualisation de 1.4% est implicitement utilisé pour pondérer les dommages futurs par rapport aux dommages présents. Par contre, le modèle DICE de Nordhaus utilise un taux d'actualisation de 5%. Ceci conduit à ce que les dommages encourus dans 200 ans jouent un rôle plus de 1000 fois supérieur dans l'analyse de Stern que dans celle de Nordhaus ! Cette différence de pondération du long terme dans l'évaluation semble pouvoir expliquer l'essentiel de la différence des valeurs carbonées proposées par ces deux auteurs (85 \$/tCO2 pour Stern, et 8 \$/tCO2 pour Nordhaus).

⁸ Pour illustrer, supposons que le dommage soit normalement distribué, mais que l'espérance de cette variable aléatoire soit inconnue. Si l'espérance est elle-même normalement distribuée, la distribution non-conditionnelle du dommage devient gouvernée par une loi de student-*t*, dont on sait qu'elle se caractérise par une surfréquence des événements extrêmes par rapport à la loi normale de même variance.

J'ai à de multiples reprises donné mon avis sur le taux d'actualisation à utiliser dans les analyses coût-bénéfice impliquant le très long terme. En accord avec la Commission Lebégue dont je fus membre, je recommande un taux d'actualisation de 2%. Ce taux intègre deux dimensions qui s'opposent. D'un côté, l'anticipation d'une hausse du niveau de développement économique de l'humanité dans les décennies et siècles à venir suggère un taux d'actualisation élevé, pour réduire le sacrifice des pauvres générations actuelles pour le bénéfice de nos très riches descendants. D'un autre côté, cette croissance anticipée n'est pas certaine. Cette incertitude mérite une certaine prudence, et un effort accru en faveur des générations futures qui devront la porter. Ceci milite en faveur d'un taux d'actualisation relativement faible. Reprenons en détail ces deux éléments de l'analyse.⁹

L'effet richesse est lié à notre désir de réduire les inégalités de consommation dans le temps. En conséquence, nous ne sommes prêts à sacrifier un peu de notre bien-être présent que si notre anticipation de l'avenir est moins favorable que ce présent, ou que si le rendement social de ce sacrifice est élevé. Au contraire, si on anticipe une hausse de revenu à l'avenir, cela réduit notre propension à épargner. La rentabilité de notre épargne doit être suffisamment accrue pour compenser l'augmentation des inégalités intertemporelles de consommation que cette épargne génère. Au niveau collectif, il existe donc un lien entre le taux de croissance de la consommation et le taux de rentabilité minimal du capital qui justifie ce niveau de sacrifice envers l'avenir. En l'absence de friction, ce taux de rentabilité est le taux d'intérêt d'équilibre sur le marché du crédit, et le taux d'actualisation socialement désirable. Plus élevé est le taux de croissance anticipé de l'économie, plus élevé est le taux d'actualisation. En un mot, pourquoi faire des sacrifices aujourd'hui pour un avenir de toute façon plus favorable ? Cette relation positive entre croissance et taux d'intérêt est empiriquement vérifiée, puisque ce dernier croît lorsque les ménages anticipent une accélération de la croissance, et décroît lorsque l'économie décélère ou s'apprête à entrer en récession.

Les économistes ont cherché à quantifier le lien entre taux de croissance g de l'économie et taux d'actualisation r . La règle de Ramsey (1928) s'écrit $r = \delta + \gamma g$, où δ est le taux de préférence pure pour le présent que je normalise à 0, et γ est le coefficient d'aversion aux inégalités de consommation. En d'autres termes, γ est la réponse à la question suivante : de combien faut-il augmenter le taux (en %) de rentabilité de l'épargne lorsque le taux de croissance des revenus augmente de 1%, de manière à laisser l'épargne inchangée ? Stern suppose que $\gamma = 1$. De plus, il suppose un taux de croissance du PIB mondial de $g = 1.3\%$ et un taux de préférence pure pour le présent de $\delta = 0.1\%$. C'est pourquoi son analyse est supportée par un taux d'actualisation de 1.4%. Le choix de Stern d'une valeur unitaire pour γ peut surprendre. En effet, Stern écrivait en 1977 que « *From estimates of demand systems, we have found a concentration of estimates of γ around 2 with a range of roughly 0-10.* » (Stern (1977)). Nordhaus et Weitzman préfèrent le jeu de valeurs suivant : $\gamma = 2$, $g = 2\%$ et $\delta = 1\%$, ce qui implique un taux d'actualisation $r = 5\%$!

Le taux de croissance du PIB réel des pays de l'OCDE a été proche de 2% par an depuis la révolution industrielle. A priori, il me semble qu'il n'y a pas plus d'arguments structurels en faveur d'une baisse de cette tendance que d'une hausse de cette tendance dans les décennies à venir. C'est pourquoi, je suis favorable à l'utilisation de $g = 2\%$ dans les calibrations des modèles climato-économiques de long terme. Pour des raisons, éthiques, je suis aussi

⁹ Il existe un troisième élément à l'analyse : la préférence pure pour le présent. Je considère qu'il est éthique d'utiliser un objectif intergénérationnel où le poids de l'utilité de chaque génération est le même.

favorable à imputer le même poids à toutes les générations dans la fonction de bien-être sociale, ce qui implique de choisir $\delta=0\%$. Reste le choix de γ . Il ne fait pas de doute que le choix de Stern $\gamma=1$ est trop faible. Il suggère une aversion aux inégalités relativement faible. Supposons que l'individu A soit deux fois plus riche que l'individu B. Considérons une politique de redistribution qui implique que chaque euro pris au riche A permette de donner k euro au pauvre B. Sous l'hypothèse de Stern ($\gamma=1$), cette politique est socialement désirable dès lors que k est supérieur à $1/2$. Pour Nordhaus et Weitzman qui supposent une aversion aux inégalités plus forte ($\gamma=2$), cette politique est désirable dès lors que k est supérieur à $1/4$. Le choix de γ revêt donc une dimension éthique qu'il n'est pas de mon ressort de trancher, mais j'aurais personnellement tendance à préférer $\gamma=2$.¹⁰ J'en conclus que l'effet richesse milite pour un taux d'actualisation autour de $r=4\%$ réel par an.

La prise en compte de l'incertitude tend à réduire ce taux, mais il n'existe pas de consensus sur l'intensité de cette réduction. Par contre, un certain consensus semble s'établir sur l'hypothèse que cette réduction est d'autant plus importante que l'horizon temporel considéré est grand. Weitzman (2007b) suggère même que cette réduction tend vers l'infini pour des horizons longs ! Reprenons l'argument pour en comprendre les implications opérationnelles. L'incertitude à laquelle les ménages sont traditionnellement confrontés tend à accroître leur épargne de précaution. En d'autres termes, l'incertitude affectant l'avenir a un effet positif sur la propension à sacrifier le présent pour améliorer l'avenir. Une forte incertitude affectant l'avenir incite les ménages à épargner même quand la rentabilité de cette épargne est faible. En conséquence, le taux d'actualisation est négativement lié à l'incertitude affectant la consommation future.

Cet effet de précaution modifie la règle de Ramsey en rajoutant un troisième terme dans le membre de droite, de la façon suivante : $r = \delta + \gamma g - 0.5 \gamma^2 \sigma^2$, où σ^2 est la variance du taux de croissance de la consommation. L'effet de précaution $-0.5 \gamma^2 \sigma^2$ a bien un effet négatif sur le taux d'actualisation r , mais cet effet est marginal à court terme. En effet, la volatilité σ du taux de croissance de la consommation au 20^{ième} siècle est généralement estimée autour de 2% par an. En prenant $\gamma=2$, on obtient un effet précaution égal à -0.08% , impliquant un taux d'actualisation socialement désirable de 3.92%.

Lorsque les chocs affectant le taux de croissance de la consommation ne sont pas corrélés dans le temps, il est socialement efficace d'utiliser le même taux d'actualisation quelque soit la durée de l'investissement considéré. Par contre, si les chocs sont positivement corrélés dans le temps, c'est-à-dire si les chocs sont persistants, l'incertitude affectant la consommation future est magnifiée dans le long terme, ce qui justifie un effet précaution qui croît avec la durée de l'investissement. La persistance des chocs sur le taux de croissance du PIB justifie donc une structure par terme décroissante du taux d'actualisation. Il y a de multiples façons de modéliser cette persistance. Le cas le plus simple se produit lorsque la loi de distribution des chocs sur le taux de croissance annuelle est inconnue. Supposons par exemple que le taux de croissance espéré soit inconnu. Dans ce cas, un taux élevé observé les premières années permet de réviser à la hausse nos anticipations de croissance future. Il y a donc un phénomène de persistance des chocs perçus. Weitzman (2007b) montre que si nos croyances sur la distribution du taux espéré de croissance ou sur sa variance ont un support non borné, alors, l'effet de précaution devient infini pour des horizons très long, et le taux d'actualisation socialement désirable tend vers -100% . Gollier (2007b, 2008) dérive un résultat plus général

¹⁰ Cette préférence provient de l'identité entre aversion relative au risque et aversion aux inégalités que sous-tend la théorie Rawlsienne du voile d'ignorance. Une aversion relative au risque de 2 est raisonnable.

relatif à la décroissance de la structure par terme du taux d'actualisation, et examine des calibrations plus réalistes des croyances. Ces travaux suggèrent qu'il est socialement efficace de prendre un taux autour de 4% pour actualiser les bénéfices relativement proches (inférieurs à 30 ans), mais d'utiliser un taux tendant vers 2% pour des bénéfices se réalisant dans un avenir très éloignés. Ce taux de 2% n'est pas très éloigné des 1.4% utilisés par Stern.

4. Etalement des efforts dans le temps

J'ai décrit dans les deux sections précédentes le mécanisme de quantification de la distribution des dommages futurs, de l'évaluation de leur équivalent certain et de leur valeur actualisée. La valeur carbone socialement efficace est égale à cette valeur actualisée du flux d'équivalents certains des dommages futurs. Cette valeur gouverne les décisions individuelles de réduction des émissions de GES. La messe serait donc dite. Cette vision des choses est bien sûr exagérément optimiste, pour plusieurs raisons. Premièrement, comme on l'a vu dans la section 1, la quantification de la distribution des dommages et le calcul des équivalents certains restent aujourd'hui encore des objectifs inatteignables étant donné la complexité et la diversité des impacts. Cela conduit à substituer souvent une analyse coût-bénéfice par une approche coût-efficacité qui élimine le problème de la détermination de l'objectif de réduction, choix cédé à la sphère politique. Deuxièmement, une majorité des décisions individuelles de réduction des émissions nécessite de disposer de la chronique complète des prix du carbone sur des horizons très longs : 60 ans pour une centrale nucléaire, plusieurs siècles pour certaines infrastructures de transport,... Il est donc crucial de pouvoir donner des indications claires et crédibles sur les évolutions du prix du carbone sur le long terme. Finalement, des informations nouvelles susceptibles de modifier fondamentalement la politique de lutte contre l'effet de serre doivent être anticipées, ce qui nécessite d'introduire dans l'analyse deux outils cruciaux de gestion des risques : les valeurs d'option et la flexibilité. Cette section est consacrée à l'analyse de ces différents ingrédients.

4.1. Croissance du prix du carbone dans le temps

Une condition d'optimalité bien connue, rappelée plus haut, est qu'à tout instant, le prix du carbone soit égal au dommage marginal actualisé généré par la tonne de carbone émise. L'évolution de ce prix dans le temps est donc dictée par l'évolution du dommage marginal du CO₂. Supposons que la concentration de CO₂ croisse dans le temps, et que le dommage soit une fonction convexe de cette concentration, comme supposé par la plupart des modèles intégrés disponibles. Dans ce cas, le coût marginal du CO₂ – et la valeur carbone – croît dans le temps. Par exemple, le modèle DICE de Nordhaus produit un prix du carbone qui croît à 2% par an. Si on suit la politique considérée par Nordhaus (2008, p. 91) comme optimale, le prix du carbone devrait être de 9 \$/tCO₂ en 2010, 25 \$/tCO₂ en 2050, et 55 \$/tCO₂ en 2100.

Le modèle DICE explicite une comparaison des coûts d'abattement et de ses bénéfices, de manière à ce qu'à tout instant coûts marginaux et bénéfices marginaux d'abattement s'égalisent. Cela conduit à la caractérisation d'une politique dynamique d'abattement socialement efficace. La logique de la hausse tendancielle de la valeur carbone est donc claire : dans le court-terme, les dommages causés par le changement climatique sont trop marginaux pour que nous y consacrons une fraction importante de notre capital productif, dont la rentabilité est par ailleurs élevée. Néanmoins, au fur et à mesure que la concentration de GES s'accroît la valeur actualisée des dommages marginaux tend à s'accroître, et les

efforts de réduction des émissions deviennent de plus en plus rentables, socialement parlant. C'est cet argument fondamental, combiné avec un taux d'actualisation relativement élevé, que Nordhaus met en avant pour reporter les efforts de lutte contre l'effet de serre à plus tard. Le dosage précis de ce report des efforts dans le temps dépend d'un grand nombre de facteurs, dont la fonction d'impact/concentration, et l'évolution des coûts d'abattement dans le temps.

Néanmoins, la plupart des autres modèles disponibles utilisent une approche coût-efficacité dans laquelle un objectif exogène de concentration-limite est fixé, en général entre 500 ppm et 650 ppm. Reconnaisant la difficulté à quantifier les bénéfices de la lutte contre le changement climatique, ces modèles se limitent donc à décrire la meilleure chronique d'abattement et de prix du carbone pour atteindre l'objectif de concentration-plafond exogènement fixé. Ce type de modèle prend donc comme un fait-accompli les politiques du type facteur 4 français (réduction des émissions de 75% en France d'ici 2050), ou la règle européenne de la réduction de 20% des émissions de GES d'ici à 2020. Cette approche alternative à celle d'une optimisation globale semble contourner les principales difficultés rencontrées dans la démarche précédente puisqu'il n'est plus nécessaire de passer par l'analyse du coût social du carbone et de définir une fonction des dommages. L'objectif de réduction des émissions étant prédéfini, on considère que le stock de CO₂ susceptible d'être émis devient lui-même fini, le problème économique se transforme alors radicalement et peut être assimilé à celui dans lequel on s'interroge sur l'utilisation optimale d'une ressource rare. On est alors ramené au cas traditionnel et bien connu initié par Hotelling qui a fait l'objet lui aussi de nombreux débats et qui a été développé dans la littérature en économie de l'environnement sur la gestion des ressources naturelles épuisables. Sans entrer ici dans l'ensemble des développements théoriques, on rappellera le résultat final le plus simple qui établit que la valeur (prix) qui permet d'optimiser la consommation dans le temps de la ressource rare croît au même rythme que le taux d'intérêt, la question du prix initial restant un des points délicats de l'approche (voir Baumstark et Gollier (2008)).

L'intuition de ce résultat est simple. Considérons une stratégie consistant à reporter l'effort d'abattement à la marge de t à $t+\Delta t$. Cette stratégie est neutre par rapport à l'objectif de concentration. Mais elle permet d'épargner le coût marginal d'abattement en t , tout en augmentant le coût en $t+\Delta t$ d'un montant égal au coût marginal d'abattement prévalant à cette date. Si l'épargne en t est placée au taux sans risque, la rentabilité sociale de cette stratégie est donc égale à la différence entre ce taux d'intérêt et le taux de croissance du coût marginal d'abattement. Donc, si le coût marginal croît à un taux inférieur au taux d'intérêt, cette substitution intertemporelle est socialement désirable, et la chronique d'émission initialement considérée ne peut être efficiente. Un raisonnement symétrique peut être fait lorsque le coût marginal croît à un taux supérieur au taux d'intérêt. En conséquence, une condition nécessaire d'efficacité est que le coût marginal d'abattement, donc la valeur carbone, croisse au taux d'intérêt.¹¹

Dès lors que le taux de croissance de la valeur carbone est fixé, il ne reste plus qu'un seul degré de liberté pour atteindre l'objectif de concentration : la valeur initiale du CO₂. A partir de cette valeur initiale, on déduit la chronique de valeurs sur l'ensemble de la période, ce qui permet à chaque acteur de déterminer sa stratégie d'investissement et d'émission, et

¹¹ On peut généraliser ce raisonnement pour tenir compte de l'absorption naturelle du carbone atmosphérique par les océans ou la photosynthèse. L'intensité de cette absorption est en première approximation proportionnelle à la concentration de CO₂ atmosphérique. Dans ce cas, il peut être intéressant d'émettre plus en début de période, en vue de bénéficier de cet effet d'absorption. Dans ce cas, il faut modifier la règle en déduisant le taux d'absorption naturel du taux d'intérêt (voir la contribution de Katheline Schubert dans le Rapport Quinet (2008)).

d'anticiper l'évolution de cette stratégie dans le temps. Une hausse de la valeur initiale conduit à une hausse de l'ensemble de la chronique, et donc à une baisse des émissions, d'autant plus importante que l'élasticité (à long terme) des émissions au prix du carbone est importante. Il existe donc une valeur carbone initiale qui permet d'atteindre l'objectif de concentration désiré.

Dans le cadre de la Commission Quinet (2008), le Conseil d'Analyse Economique a mené plusieurs études basées sur des modèles climato-économiques (IMACLIM-R, GEMINI-E3 et POLES) pour décrire le profil temporel de la valeur carbone. Evidemment, les résultats de ces études sont fortement sensibles aux hypothèses qui sont faites dans les modèles. De ses travaux, trois dimensions se dégagent comme affectant de façon déterminante le profil de la valeur carbone : la croissance économique, l'objectif de concentration et les hypothèses sur le progrès technique futur. Ces dimensions sont entachées de très importantes incertitudes. Une hausse de l'anticipation de croissance économique tend à accroître les émissions, ce qui doit être compensé par une augmentation de la valeur carbone. En conséquence, une modification de ces anticipations à l'avenir nécessitera une adaptation de la valeur carbone. On peut aussi raisonnablement anticiper que l'objectif ultime de réduction des émissions que les européens se sont fixés sera sujet à réévaluation à l'avenir, en fonction des nouvelles connaissances sur les mécanismes physico-chimiques de l'effet de serre, sur l'effet d'entraînement ou non de l'exemple européen à d'autres zones géographiques du monde, ou sur l'évaluation des impacts du changement climatique. Comme on le voit dans le rapport Stern, ce dernier élément, crucial pour déterminer l'objectif de concentration maximal socialement désirable, est très incertain.

Mais l'incertitude porte aussi sur les innovations technologiques vertes que l'on peut espérer à l'avenir, dont on pense qu'elles nous permettront d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ à un coût économique et social beaucoup plus faible qu'aujourd'hui. Ainsi, selon que nous parvenons à développer ou non la technique de séquestration du Carbone, la fusion nucléaire, le solaire ou l'éolien à des coûts qui rendent ses technologies efficaces, notre vision du problème climatique sera différente. Si on est optimiste, pour forcer le trait, rien ne sert de se lancer dans des efforts coûteux aujourd'hui. En particulier, certains modèles mettent en œuvre un processus de « learning by doing » qui génère de fortes réductions des coûts d'abattement à l'avenir. Si on anticipe que ce phénomène permet à terme à ces technologies de devenir efficaces, cela conduit à une réduction de la valeur initiale du carbone recommandée par ces modèles. Une conséquence indirecte de cette baisse est une réduction de l'effort de R&D des entreprises, dont certains pensent justement qu'il constitue la meilleure chance de résoudre le problème climatique à long terme. Ici aussi, il est très difficile d'appréhender l'impact à long terme de la R&D sur la réduction des coûts d'abattement.

L'incertitude sur ces différentes dimensions doit gouverner la politique publique dans le sens d'une prudence raisonnée. Elle affecte la politique efficace de deux façons. Premièrement, la valeur carbone, qui doit continuer à croître *en espérance* au taux d'intérêt, devrait être flexible pour tenir compte des informations nouvelles qui seront révélées à l'avenir sur l'objectif socialement désirable de concentration ou sur l'arrivée de technologies efficaces de réduction des émissions ou de séquestration. L'aspect négatif de cette flexibilité, c'est le risque qu'elle fait porter sur les émetteurs et sur les innovateurs potentiels. Investir dans des technologies vertes pour profiter du prix du carbone devient risqué, et réduit donc les incitations. Néanmoins, ce risque n'est que le pendant normal des multiples incertitudes inhérentes au système, et il est naturel que ce risque soit porté par les acteurs. Ceci milite pour la création de marchés futurs ou d'assurance permettant de couvrir le risque des acteurs les plus

risquophobes. Le problème est que flexibilité et crédibilité font rarement bon mariage, le refus de s'engager sur un prix du carbone à long terme pouvant être perçu comme une faiblesse des Etats à s'engager. En même temps, qui pourrait croire en la crédibilité d'une politique européenne totalement rigide basée sur l'hypothèse d'un accord mondial en faveur du climat, alors qu'un tel accord est très incertain ? Qui pourrait croire que l'Europe pourrait maintenir une politique ambitieuse de réduction d'émission et de prix élevé du carbone durant 50 ans si elle reste la seule à le faire ? Hors, la crédibilité de l'engagement à long terme est crucial pour le succès d'une politique basée sur les signaux prix. Il s'agit dès lors d'annoncer de façon transparente non pas une chronique déterministe de prix, mais bien un mécanisme de révision du prix basé sur des règles prédéfinies intégrant les éléments affectant la valeur carbone discutés ci-dessus.

Deuxièmement, l'incertitude doit nous inciter à la prudence dans la fixation du prix initial du carbone. Ce prix doit effectivement intégrer l'espoir de l'émergence de solutions peu coûteuses au changement climatique, mais aussi le risque que de tels espoirs ne se réalisent pas. Exactement comme les ménages augmentent leur épargne de précaution lorsque de nouvelles incertitudes s'accumulent sur leur avenir, nous devons collectivement imputer une « prime de précaution » à la valeur initiale du carbone pour tenir compte des incertitudes relatives au progrès technique vert, à la géopolitique du climat, et aux dommages liés aux modifications de ce climat. Baumstark et Gollier (2008) examinent plus en détails cette prime de précaution sur le carbone.

Ces incertitudes génèrent aussi des désaccords entre les modèles intégrés. Ainsi, le prix désirable de la tonne de CO₂ en 2030 est de 42 € ou 160€ respectivement pour le modèle GEMINI-E3 et IMACLIM-R. Sur ces bases, le rapport Quinet préconise la fixation d'une valeur initiale du carbone à 100 €/tCO₂ en 2030. Si on tient compte d'un taux de croissance de la taxe de 4% par an, on obtient un prix de 45€/tCO₂ en 2010. Néanmoins, le fait est qu'il existe une réelle incertitude que ce prix ne soit pas mis en œuvre dans tous les pays et dans tous les secteurs, ce qui introduirait d'importantes inefficacités si un tel prix était mis en œuvre sur l'Europe seule, voire sur la France seule. La commission Quinet a donc proposé un prix plus réaliste de 32 €/tCO₂ en 2010. Cette valeur devrait monter à 100 €/tCO₂ en 2030, puis atteindre une valeur comprise entre 150 et 350 €/tCO₂ en 2050, avec une cible à 200 €/tCO₂ compte tenu des connaissances actuelles.

4.2. Prix du carbone et crise économique

L'imposition d'une valeur de marché à une externalité est de nature à améliorer le bien-être intertemporel. Néanmoins, à court terme, cette modification structurelle de notre économie s'accompagne d'une réallocation de nos ressources et de nos investissements. Au lieu de produire des biens et des services nouveaux, une fraction non négligeable – Stern recommande jusqu'à 20% du PIB mondial – de nos capitaux physiques et humains pourrait être réorientée vers la lutte contre l'effet de serre. Ceci pourrait représenter un sacrifice considérable pour les générations présentes. Concrètement, les ménages vont investir dans la rénovation de leur système de chauffage ou d'isolation de leur habitation (on parle d'une hausse de 15% du coût de construction en vue de satisfaire les nouvelles normes en 2010 en France), l'achat de véhicule moins polluant. Cette réallocation des budgets domestiques se fera en défaveur de l'achat d'autres biens de consommation et de loisir. De même, la production d'électricité va être renchéri par les investissements dans des sources d'énergie renouvelables dont on sait qu'elles sont plus coûteuses que la production en base, d'origine

nucléaire en France. Comme ces investissements sont pris en compte dans le calcul du PIB, ce sacrifice n'apparaîtra pas comme tel dans la comptabilité nationale. Les investissements nécessaires consécutifs aux décisions du Grenelle ou à l'imposition d'une valeur carbone élevée pourraient bien apparaître comme un moyen de relancer l'économie, et créer des dizaines de milliers d'emploi en France, mais cela se ferait paradoxalement en défaveur du bien-être des citoyens des générations actuelles. Il est difficile d'estimer ce sacrifice.¹² Stern (2007) l'estime à 1% du PIB mondial de façon permanente, mais ce calcul a prêté à de vives controverses.

Comme ces citoyens sont aussi actuellement confrontés à une crise financière et économique sans précédent depuis la fin de la seconde guerre mondiale, avec une chute importante du pouvoir d'achat et une hausse du chômage, on peut s'interroger sur la pertinence de mettre en œuvre une telle politique dans le contexte actuel. De même, la situation financière des entreprises n'est guère propice à l'investissement et à l'augmentation de leur coût de production, en particulier si l'on tient compte des « fuites de carbone » par la création d'une concurrence déloyale des entreprises étrangères non soumises à la valeur carbone. Plus généralement, on peut s'interroger sur la relation entre la valeur carbone et le cycle économique.

Si on raisonne sur la base que la valeur carbone à tout instant est égale à la valeur présente des dommages marginaux des émissions actuelles, la seule raison qui pourrait militer en faveur de la baisse de la valeur carbone est basée sur l'idée que la crise économique, si elle est persistante, devrait réduire naturellement les émissions sur une longue période, et freiner la hausse de la concentration dans le temps. Si la fonction de dommage est convexe avec la concentration, la valeur actuelle des dommages marginaux d'une tonne de CO₂ émise aujourd'hui devrait s'en trouver réduite. Néanmoins, si la crise économique est persistante, et si elle réduit de façon durable le taux de croissance économique, ceci devrait avoir pour effet de réduire le taux d'actualisation.¹³ Cela aura alors mécaniquement pour effet d'augmenter la valeur carbone. Ces deux effets contradictoires pourraient bien s'annuler réciproquement dans cette configuration. Le scénario alternatif est celui d'une crise économique courte, avec un rapide retour d'anticipations optimistes sur la croissance économique. Dans ce cas, l'effet dépressif sur les émissions devient quasi inexistant, mais la hausse du taux d'actualisation dû à l'effet richesse peut avoir pour conséquence une baisse importante de la valeur carbone durant cette période de récession temporaire. Il y a donc bien une relation inverse entre le niveau de l'activité économique et la valeur carbone. Cela va bien dans le sens de lisser les efforts dans le temps, objectif désirable de l'action publique dès lors que les ménages éprouvent une aversion aux fluctuations de la consommation dans le temps.

Si on raisonne dans le schéma alternatif coût-efficacité avec un objectif exogène de concentration limite à un horizon donné, il faut prendre en compte l'effet de la récession sur les émissions. Si la crise économique affecte durablement les perspectives de croissance, les émissions en seront réduites d'autant, et la valeur carbone pourra être réduite en conséquence. Ici aussi, il y a une relation négative entre anticipation de taux de croissance économique et valeur carbone.

¹² Le calcul consiste à constater qu'un prix de 32 €/tCO₂ conduit à une dépense totale de 864 milliards d'euros par an, c'est-à-dire à une dépense par habitant de 144 €/par an, n'est pas pertinent puisque cette dépense supplémentaire correspond à une recette fiscale ou parafiscale pour les Etats.

¹³ Le taux d'actualisation dépend de nos anticipations de croissance économique. Par l'effet richesse, une baisse de ces anticipations doit nous inciter à réviser à la baisse le taux d'actualisation. Le rapport Lebègue a clairement exprimé ce point.

Je conclus ici qu'il est désirable de moduler le prix du carbone inversement aux anticipations de croissance économique. Ceci aura pour résultat d'augmenter les efforts de réduction des émissions de GES en phase haute du cycle économique, et de réduire ces sacrifices durant les périodes plus difficiles en phase basse du cycle. Si on a un objectif de relance keynésienne à l'esprit en période de récession, mieux vaut investir dans des projets générant des bénéfices immédiats pour le citoyen, que dans la lutte contre l'effet de serre dont les bénéficiaires seront les générations futures !

4.3. Valeurs d'option

Cette incertitude sur l'évolution de la valeur carbone introduit une dimension supplémentaire dans l'analyse du timing optimal de lutte contre l'effet de serre. Au niveau collectif, cette incertitude offre une prime aux actions flexibles, ou moins irréversibles. Cette « valeur d'option » est souvent invoquée comme un argument en faveur de la mise en œuvre d'actions massives et immédiates en faveur de la lutte contre l'effet de serre. En effet, l'émission de GES est essentiellement irréversible (sauf mise en œuvre de technologies de séquestration du carbone atmosphérique). S'il apparaît demain que les émissions d'aujourd'hui ont en fait un effet beaucoup plus dévastateur qu'initialement prévu, il sera impossible de revenir en arrière. Il y a donc une valeur d'option à réduire les émissions de façon conséquente dès aujourd'hui. Mais il existe une autre forme d'irréversibilité qui milite en sens inverse. La plupart des investissements en capital physique permettant de réduire les émissions sont irréversibles : parc éolien et photovoltaïque, isolation thermique,.... Si on apprend demain que le problème du changement climatique est moins sévère que prévu, ou si une technologie nouvelle émergeait qui permette une réduction massive des émissions à faible coût, on aurait investi aujourd'hui inutilement. Cette forme d'irréversibilité offre une valeur d'option à reporter les efforts, et milite donc en faveur d'une stratégie plus attentiste. Je ne connais aucune étude permettant de déterminer laquelle de l'irréversibilité entropique ou de l'irréversibilité de l'investissement physique domine l'autre. Il n'existe pas de modèle intégré suffisamment fin permettant de répondre à cette question. Nordhaus (2008) suggère que l'irréversibilité entropique n'a qu'un effet marginal sur la décision optimale de lutte contre l'effet de serre.

Cette incertitude au niveau collectif percole naturellement au niveau individuel, puisqu'elle génère une incertitude sur le prix futur du carbone. Je ne reviens pas ici sur la nécessité de cette approche flexible, malgré l'aversion au risque des acteurs économiques. Le fait est que cette incertitude sur l'évolution des prix a pour corollaire une valeur d'option à reporter les investissements permettant de lutter contre les émissions de GES. Cela pourrait suggérer une compensation dans le système incitatif par une hausse de la valeur initiale de la tonne de CO₂.

5. Conclusion

D'après Stern (2007), en l'absence d'une action internationale vigoureuse, l'effet du changement climatique pour les générations futures est équivalent à une chute immédiate et permanente du PIB mondial compris entre 5% et 20% du PIB mondial. La question du prix du carbone est de savoir ce que nous sommes prêts à faire pour empêcher que ceci se passe. La mise en œuvre d'une politique efficace de lutte contre l'effet de serre fera mal aujourd'hui, mais profitera essentiellement à nos lointains descendants.

Se pose la question de l'intensité de cet effort et de son étalement dans le temps. De très importants désaccords prévalent aujourd'hui entre les différents spécialistes du domaine. En particulier, Stern propose une valeur carbone de 85 \$/tCO₂, alors que Nordhaus recommande plutôt une valeur carbone de 8 \$/tCO₂ ! La proposition de Stern conduirait à un changement radical de nos modes de consommation d'énergie à très court terme, avec des coûts importants de mise en œuvre, alors que la recommandation de Nordhaus n'aurait qu'un impact très marginal à court et moyen terme. Comment expliquer ces différences aussi fondamentales ?

En ce qui concerne le traitement de l'incertitude sur les dommages, les développements récents de la littérature suggèrent que les modèles actuels ne les appréhendent pas de façon efficace. En particulier, il est probable que la vraisemblance de scénarios climatiques extrêmes doive jouer un rôle beaucoup plus important dans la détermination de la valeur carbone que ce qui est proposé autant dans le rapport Stern que dans les travaux de Nordhaus. Hélas, il n'existe pas à ce jour de consensus sur la manière de traiter les événements extrêmes, ainsi que l'ambiguïté sur les probabilités. La difficulté ici est de mettre en place une méthode d'évaluation des risques qui appréhende bien les queues de distribution, sans rentrer dans le cercle vicieux du catastrophisme.

On connaît l'importance du choix du taux d'actualisation lorsque le long terme constitue un élément crucial du contexte. Nordhaus et Stern s'opposent effectivement à ce sujet. Stern sous-estime l'effet richesse en choisissant une aversion aux inégalités intertemporelles trop faible et un taux de croissance économique relativement pessimiste. Par contre, pour des horizons longs, ce pessimisme excessif est compensé par l'existence d'un effet de précaution mal appréhendé par les deux protagonistes. J'en conclus que le choix d'un taux de 1.4% par Stern est plus proche de l'optimum social de 2% que le taux de 5% utilisé par Nordhaus.

Ces deux éléments militent en faveur d'une action vigoureuse de lutte contre l'effet de serre. Néanmoins la quantification de la valeur sociale du carbone reste très délicate à cause de la complexité et de la multiplicité des sources d'incertitude. C'est pourquoi l'approche favorisée actuellement est celle d'une analyse coût-efficacité dans laquelle l'objectif de concentration à un horizon donné est fixé de façon exogène. L'objectif Facteur 4 conduit à recommander un prix actuel de la tonne de CO₂ autour de 30€ Son évolution dans le temps devrait être flexible, de manière à tenir compte de façon transparente de plusieurs facteurs : activité économique, progrès technologique vert, adhésion de nouveaux pays à un accord global de réduction des émissions. Cette incertitude sur l'évolution du prix du carbone devrait être compensée par des mécanismes de marché permettant la couverture de ces risques de long terme pour les opérateurs les plus sensibles ou les plus exposés à ces risques. En tout état de cause, le mécanisme prédéfini -- mais flexible -- devrait être tel que le taux de croissance du prix du carbone tourne autour de 4% par an *en espérance*. Ceci implique un prix espéré de la tonne de CO₂ autour de 200 € en 2050, en accord avec le rapport Quinet (2008).

Bibliographie

Barro, R.J., (2009), "Rare Disasters, Asset Prices, and Welfare Costs," *American Economic Review* 99, 243-264.

Barsky, R.B., F.T. Juster, M.S. Kimball et M. Shapiro, (1997), Preference parameters and behavioral heterogeneity: An experimental approach in the health and retirement study, *Quarterly Journal of Economics*, 537-79.

Baumstark, L., et C. Gollier, (2008), La dynamique de la valeur carbone en environnement incertain, miméo, Toulouse School of Economics.

De Perthuis, C., (2009), *Et pour quelques degrés de plus...: Nos choix économiques face au risque climatique*, Person.

Diamond, J., (2005), *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Press.

GIEC, (2007), [Climate Change 2007: the AR4 Synthesis Report](#), edited by Rajendra K. Pachauri, IPCC Chairman, Andy Resinger, Head of Technical Support Unit, The Core Writing Team, published by IPCC, Geneva, Switzerland.

Gollier, C., (2007a), La finance durable du rapport Stern, *Revue d'Economie Politique*, 117 (4), 463-473.

Gollier, C., (2007b), The consumption-based determinants of the term structure of discount rates, *Mathematics and Financial Economics*, 1 (2), 81-102.

Gollier, C., (2008), Discounting with fat-tailed economic growth, *Journal of Risk and Uncertainty*, 37, 171-186.

Hope, C., 2006. The marginal impact of CO2 from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern. *Integrated Assessment* 6 (1), 19-56.

Mendelsohn, R.O., (2007), A critique of the Stern Report, *Regulation*, winter 2006-2007, 42-46.

Nordhaus, W., (2008), *A question of balance: Weighing the options on global warming policies*, Yale University Press, New Haven and London.

Quinet, A., (2008), *La valeur tutélaire du carbone*, Centre d'Analyse Stratégique, www.strategie.gouv.fr.

Ramsey, F.P., (1928), A mathematical theory of savings, *The Economic Journal*, 38, 543-59.

Stern, N., (1977), The marginal valuation of income, in M. Artis and A. Nobay (eds), *Studies in Modern Economic Analysis*, Blackwell: Oxford.

Stern, N., (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press.

Tol, R.S.J., (2005), The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: An assessment of the uncertainties, *Energy Policy* 33, 2064-2074.

Weitzman, M.L., (2007a), The Stern Review on the Economics of Climate Change, *Journal of Economic Literature*, 45 (3), 703-724.

Weitzman, M.L., (2007b), Subjective Expectations and Asset-Return Puzzles,” *American Economic Review*, 97(4), 1102-1130.

Weitzman, M.L., (2009), On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change, *Review of Economics and Statistics* 91, 1-19.