
UNIVERSITÉ PARIS-X NANTERRE



À LA RECHERCHE DE LA VALEUR SOCIALE DU
CARBONE. AUTOPSIE ANALYTIQUE, NUMÉRIQUE
ET ÉPISTÉMOLOGIQUE D'UNE TENTATIVE DE
MODÉLISATION INTÉGRÉE DU CLIMAT

Baptiste Perrissin Fabert

Mémoire de Master2 Recherche : Economie du
Développement Durable, de l'Environnement et de
l'Energie

Membres du jury

M. Jean-Charles Hourcade

M. Olivier Godard

M. Patrice Dumas

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Patrice Dumas pour sa disponibilité, pour sa patience et pour tous les enseignements informatiques qu'il m'a prodigués au cours de l'année. Ce fut un pédagogue hors pair pour m'introduire dans les méandres de la modélisation intégrée.

J'exprime toute ma reconnaissance à Jean-Charles Hourcade qui m'a offert l'opportunité de travailler au CIREC et qui a su m'encourager à poursuivre mon parcours scientifique.

Je remercie également Olivier Godard pour ses conseils bibliographiques et pour sa participation à la soutenance de mon mémoire.

Merci enfin à Agathe qui a dû supporter au quotidien mes sautes d'humeur "numériques".

Table des matières

Introduction	6
1 Mise en évidence des composantes théoriques de la valeur sociale du carbone	13
1.1 Le modèle simplifié en analyse coûts/bénéfices dans le cas certain	14
1.1.1 Les conditions d’optimalité du problème	15
1.1.2 Interprétation des résultats	16
1.1.3 Recherche du taux d’actualisation social	17
1.2 Recherche de l’équilibre décentralisé du problème	20
1.2.1 Le programme des entreprises	20
1.2.2 Le programme des ménages	21
1.3 Le problème simplifié en analyse coûts/efficacité	23
1.4 Introduction de l’incertitude dans le problème simplifié en analyse coûts/bénéfices	25
1.4.1 Les conditions d’optimalité	25
1.4.2 Interprétation des résultats	27
1.4.3 Effet de l’incertitude sur le taux d’actualisation	28
1.5 Recherche de l’équilibre décentralisé dans le cas incertain	29
1.6 Le modèle complet dans le cas certain en analyse coûts/bénéfices	30
1.6.1 Les conditions d’optimalité	33
1.6.2 Interprétation des résultats	33
1.7 Le modèle complet dans le cas incertain en ACB	34
1.7.1 Les conditions d’optimalité	36
1.7.2 Interprétation des résultats	38
2 Les résultats numériques du modèle : à la recherche de la “vraie” valeur sociale du carbone	39
2.1 Spécification du modèle	40
2.1.1 Forme générale de la valeur sociale du carbone	40
2.1.2 Spécification du modèle climatique et des fonctions de dommages retenues	42

2.1.3	Surprise climatique et taux d'actualisation	42
2.1.4	Statégie numérique de recherche	43
2.2	Les résultats et leur interprétation	44
2.2.1	Les trajectoires d'abattement	44
2.2.2	Le profil de la valeur sociale du carbone	47
2.2.3	Effet du changement climatique sur le taux d'actuali- sation	49
3	Une controverse scientifique autour de la valeur sociale du carbone comme miroir du rôle de l'économiste dans le débat environnemental	55
3.1	Clarification du débat académique à partir de la controverse suscitée par le rapport Stern	56
3.1.1	Le sens des différents scénarii de calcul	57
3.1.2	Les effets du taux d'actualisation et de l'incertitude . .	60
3.2	Auto-analyse de notre démarche scientifique	64
3.2.1	La signification des résultats	64
3.2.2	Critique des methodes	70
3.3	Du rôle et de la bonne place de l'économiste au sein du débat environnemental	74
3.3.1	Recensement des compétences de l'économiste	74
3.3.2	Du bon usage des résultats de l'économiste au sein du monde réel	76
3.3.3	Le rôle de médiateur de l'économiste	79
	Conclusion	82

Introduction

Si un consensus semble se dessiner au sein de la communauté scientifique pour attester de l'origine anthropique du changement climatique, la définition de la meilleure réponse collective à adopter face à ce défi demeure encore largement sujette à controverses. Partisans d'une action précoce et partisans de l'attentisme s'affrontent sur la scène publique et tentent de s'attirer les faveurs de l'opinion en brandissant menaces de catastrophes pour les uns, et dénonciation d'une conspiration idéologico-écologique pour les autres.

Entre les deux, le coeur des décideurs publics balance. La question du changement climatique a indéniablement acquis depuis les années 1990 une place de choix sur l'agenda politique. En témoigne aujourd'hui, la volonté de la chancelière allemande Angela Merkel de faire reposer le succès de la dernière réunion du G8 sur la conclusion d'un accord avec les Etats-Unis qui aurait défini les termes d'une politique conjointe de lutte contre le changement climatique. La question climatique est ainsi propulsée au rang des priorités mondiales, des défis majeurs lancés à l'humanité du XXIème siècle (*Chirac*, 2002). Désormais nul prétendant au pouvoir ne peut faire l'économie d'un détour, au moins rhétorique, par la question environnementale. Si de tels discours possèdent une efficacité politique certaine, leur efficacité écologique demeure cependant moins évidente. Dans le cas du combat international contre le changement climatique, ce sont, pour l'instant, les arguments "attentistes" qui priment car la rhétorique des bons sentiments se heurtent rapidement à la réalité des coûts économiques et politiques d'une action prompte et énergique.

Il est aisé de caricaturer les positions erratiques des décideurs politiques, mais force est de reconnaître que la science ne leur fournit pas les éléments décisifs qui clôtureraient le débat et prescriraient avec certitude les bonnes mesures à suivre. Face aux attentes de l'opinion, les hommes politiques sont sommés de décider en pleine "méconnaissance de cause". En effet, bien que l'existence du phénomène ne soit pratiquement plus remis en cause, les conséquences du changement climatique et surtout les diverses évaluations d'impacts, qu'elles soient monétaires ou non, sont hautement incertaines. Or, en deça de toute considération morale sur l'éventuel impératif de ne pas entraver le cycle "naturel" du climat, le niveau des efforts imposé à la société dépend de l'ampleur des dommages. Si les dommages sont limités alors que les coûts d'abattement sont élevés, la position attentiste est raisonnable. Mais comme les coûts d'abattement semblent apparemment plus tangibles aux yeux des politiques et des industriels, puisqu'ils se traduisent en investissements bien réels et doivent être portés dès aujourd'hui, ils pèsent *a priori* davantage dans leurs choix que les bénéfices escomptés de tels investissements. Ces bénéfices

sont, en fait, des dommages évités dont la réalité et l'ampleur ne sont pas encore clairement établies. Ainsi le calcul coûts/bénéfices psychologique des acteurs présente un biais naturel contre une action forte et précoce, et ne favorise pas une gestion efficace de la question environnementale.

Pour surmonter ce biais et afin de répondre à l'exigence moderne de rationalisation des choix politiques, les économistes ont su s'imposer auprès des protagonistes du débat en faisant valoir l'utilité sociale de leur savoir faire. En effet, ils prétendent que leur discipline scientifique n'est pas complètement démunie, sur le plan conceptuel, pour établir des règles de décision en situation d'incertitude, pour évaluer des externalités, ou encore pour réaliser des analyses coûts/bénéfices (ACB) appliquées à des objets environnementaux. La boîte à outils de la discipline possède les instruments théoriques nécessaires à la mise en forme économique de la question environnementale. En faisant valoir l'intérêt pour la société de leurs capacités de calcul et de rationalisation des problèmes par la modélisation, de nombreux économistes revendiquent une légitimité particulière pour intervenir dans le débat et servir ainsi de guides à l'action publique (*Pearce, 2002*).

La retentissante publication du rapport Stern (*Stern, 2006*), du nom du célèbre économiste anglais qui a été mandaté par le gouvernement britannique pour diriger une étude d'évaluation des conséquences du changement climatique, consacre l'autorité intellectuelle des économistes acquise dans le champ des politiques environnementales. Ce rapport, très controversé par une partie de la communauté académique, en raison de ses conclusions alarmistes qui démentent les résultats traditionnellement acceptés et désormais "acceptables" par les experts (le modèle canonique étant le modèle DICE de W.D.Nordhaus), avait clairement l'ambition de fournir aux décideurs une représentation chiffrée de l'ampleur des dommages induits par le changement climatique (jusqu'à 20% du PIB) et des coûts liés aux efforts de réduction des émissions de GES (environ 1% du PIB). Ainsi la confrontation des coûts et des bénéfices trancherait nettement en faveur d'une action précoce dont les coûts seraient très largement compensés par la valeur présente des bénéfices. L'imposant document de plus de sept cents pages qui a été remis au Premier Ministre britannique développe les thèmes de la "valeur sociale du carbone" (VSC) ou "social cost of carbon" dans la littérature anglo-saxonne, de la taxe carbone, discute du bon taux d'actualisation social à retenir pour évaluer les projets d'investissement, et présente la méthodologie adoptée pour évaluer coûts d'abattement et dommages environnementaux.

Mais loin de recueillir un consensus parmi les économistes du changement climatique le rapport a suscité de vives critiques et a cristallisé les divergences d'opinions, de partis pris méthodologiques, voire les oppositions éthiques et politiques qui fondent les résultats des travaux scientifiques. Tandis que les

travaux canoniques des économistes du changement climatique établissent un prix actuel médian de la tonne du carbone autour de 14 dollars (*Maddison*, 2007) dans un scénario "au fil de l'eau" ou "business as usual", c'est-à-dire quand aucune mesure n'est prise pour prévenir le changement climatique, Stern trouve un prix actuel proche de 314 dollars la tonne. Alors qu'un taux d'actualisation entre 5% et 6% est communément adopté pour évaluer les projets d'investissement, en se fondant sur l'observation concrète du comportement d'épargne des ménages, Stern propose de retenir un taux de 1,4% afin de ne pas sacrifier les générations futures sur l'autel de la consommation présente et d'allonger l'horizon temporel pertinent des projets environnementaux. En dépit de leur austérité première, ces deux débats ne renferment pas que des enjeux techniques. La détermination de la valeur de la tonne de carbone doit servir de base à la fixation du montant d'une taxe carbone potentielle. Et plus concrètement la mesure de la VSC a vocation à servir de guide pour orienter les choix d'investissements des cinquante prochaines années en matière de production énergétique par exemple (construction de nouvelles centrales nucléaires, de barrages) ou encore pour guider la mise en place innovante d'un marché du carbone en fournissant une référence théorique aux acteurs qui interviennent sur ce marché. Quant au taux d'actualisation, le choix de sa valeur porte en creux un véritable projet de société et des partis pris éthiques forts. Derrière la neutralité apparente du chiffre se dessine en réalité des controverses scientifiques, morales et politiques.

Les détracteurs du rapport (*Dasgupta*, 2007) (*Maddison*, 2007) (*Nordhaus*, 2007) (*Weitzman*, 2007b) (*Tol et Yohe*, 2007) (*Yohe*, 2006) contestent la légitimité de certains partis pris et dénoncent ses carences scientifiques dont l'absence d'étude de sensibilité des résultats aux paramètres choisis. Une revue plus large de la littérature montre, de la même manière, que les économistes sont incapables de fournir aux décideurs la "vraie" valeur du carbone. La très large fourchette d'évaluation – de –11 dollars pour les plus optimistes à 1000 dollars pour les plus pessimistes – de la tonne de carbone (*Ekins*, 2005) traduit l'ampleur de leurs divergences et des erreurs conceptuelles qui brouillent la compréhension des résultats.

Une telle controverse doit-elle être considérée comme un échec du calcul économique, incapable de traiter, en toute rigueur, cet "objet limite" pour la discipline que représente l'environnement? Si les sirènes du calcul implacable ont pu séduire certains décideurs déboussolés par les événements climatiques, la prolifération de chiffres et d'évaluations contradictoires, se réclamant pourtant du même principe de rationalité, met à mal la vocation du calcul économique à guider l'action publique. Faut-il pour autant jeter hativement l'outil avec l'eau – réchauffée – du bain?

Notre démarche ne consiste pas à dénigrer les prétentions positivistes du

calcul économique qui paraissent aujourd’hui quelque peu obsolètes, mais de répondre à la question suivante : de quoi est capable et surtout que nous dit le calcul économique ? Ou dans des termes plus épistémologiques : quelle est sa puissance heuristique ? L’éclatement des résultats qu’il produit ne condamne pas nécessairement sa pertinence et peut mesurer, non pas la valeur unique d’une entité naturelle (ici le carbone) mais l’ampleur des écarts entre les valeurs et les visions du monde qui s’affrontent dans le débat du changement climatique.

Deux objectifs généraux président à cette étude : saisir la nature du discours et du savoir produit par les économistes de l’environnement et assigner à ces derniers une mission réaliste qui corresponde à leurs compétences. Partant de l’hypothèse inductiviste – fort commode pour les sciences sociales – selon laquelle le tout est dans la partie, nous poursuivons ces objectifs théoriques à partir du cas particulier de la querelle qui oppose les économistes à propos de la valeur sociale du carbone et du taux d’actualisation. Pour ce faire, une revue de la littérature est nécessaire afin de dresser un panorama des positions prises dans le débat du changement climatique, d’analyser les discours et leurs régimes de justification et enfin de saisir le rôle social que compose les économistes sur la scène publique.

Il s’agira ensuite de se colleter à l’activité de recherche proprement dite, de participer à la ”science en action” (*Latour*, 1987) en maniant les outils et les méthodes de la science économique moderne. Une telle démarche s’avère décisive pour comprendre le geste et l’esprit de l’économiste. C’est pourquoi nous soulevons le défi de répondre aux mêmes questions scientifiques, que celles qui déchirent les différentes tribus d’économistes de l’environnement. Ainsi nous reprenons à notre compte la métaphore du planificateur bienveillant dont l’objectif est de maximiser un critère utilitariste escompté intertemporel afin de tracer les sentiers de croissance, de consommation et d’abattement des émissions de CO₂ optimaux pour la société. Il dispose pour cela d’un modèle intégré de l’économie ; intégré en ceci qu’il mêle des arguments purement économiques : dynamique du capital, critère d’utilité espérée, fonction de dommages, fonction de coût d’abattement, à des paramètres issus des sciences du climat : cycle du carbone, dynamique des températures. Il intègre ainsi le monde physique à la sphère économique par l’intermédiaire des dommages, exprimés en termes de pertes de bien-être ou de consommation, provoqués par le changement climatique. Le modèle tisse la chaîne implicite suivante : émission de CO₂ – concentration en carbone de l’atmosphère – hausse des températures – dommages économiques. Doté d’un équipement fort rudimentaire : un critère, une fonction de production, une fonction de dommages, une fonction de coûts d’abattement, les dynamiques du carbone et des températures, le planificateur bienveillant cherche à calculer, numéri-

quement au moins, la valeur sociale du carbone et de déterminer le bon niveau de taxe pour décentraliser l'optimum. Un compte rendu honnête et détaillé des étapes analytique et numériques de cette recherche nous permettra par la suite de proposer une montée en généralité et d'assigner à l'économiste son rôle et sa "bonne" place dans le débat public.

Dans le premier chapitre, purement analytique, nous présentons des modèles de croissance avec cycle de carbone dans un ordre de complexité croissante. Nous explorons les résultats produits par la méthode standard d'optimisation sous contraintes de Lagrange appliquée à notre modèle économique intégré dans le cas d'une ACB, ou dans celui d'une analyse coûts/efficacité (ACE). Les multiplicateurs de Lagrange associés aux équations du problème sont les véritables pivôts du calcul de maximisation et, traditionnellement, la vulgate économique les interprète comme des prix implicites. Se dégagent ainsi du calcul les conditions d'optimalité du modèle, la dynamique du prix implicite du carbone le long de la trajectoire optimale de l'économie. De pure forme, ce prix implicite devient un signal économique concret, riche de sens pour les agents économiques puisque ces derniers établissent tous leurs calculs en fonction de ces signaux qui résument l'information disponible. L'interprétation des conditions du premier ordre nous permettra de démêler les composantes du prix implicite du carbone et donc de donner un sens économique à ce qu'on appelle la valeur sociale du carbone.

D'autre part, cette étape analytique permet de caractériser, par quelques transformations calculatoires, la forme du taux d'actualisation social et par suite de la confronter à sa forme canonique. Les résultats s'interprètent en fait aisément à l'aune du socle de la théorie de l'économie néoclassique. Cependant l'interprétation se complique dès qu'une dose d'incertitude est introduite dans le modèle. L'incertitude porte sur les dommages du carbone et donc sur la forme de la fonction de dommage. Le planificateur bienveillant sait en revanche que l'incertitude sera levée à une date future et doit composer avec cet unique indice et les différents scénarii pondérés par leur probabilité d'occurrence pour élaborer à l'instant présent la trajectoire optimale de l'économie. Ainsi cette trajectoire n'est pas révisable dans le temps et notre modèle ne se place pas dans le cadre d'un processus de décision séquentiel. Nous analyserons les différents effets de l'incertitude sur les résultats.

Le second chapitre prend le relais du premier. Le problème analytique étant trop complexe pour être résolu jusqu'à la caractérisation de la solution optimale, une méthode de calcul numérique GAMS permet de pallier les limites de l'analyse. Tandis que l'étape analytique, par son haut degré d'abstraction, met au jour des phénomènes et donne l'intuition des mécanismes économiques, la phase numérique transfère au modèle sa chair empirique. Le modèle sert de révélateur, le modélisateur invente des dispositifs pour forcer

le réel à se manifester et à produire les traces de son existence. Ces propos peuvent cependant prêter à confusion en laissant entendre que l'économiste poursuivrait un rêve positiviste de dévoilement de la réalité; réalité trop confuse pour être perçue par le sens commun mais potentiellement accessible au chercheur qui observe le monde à travers les lunettes de la rationalité. Traquer la valeur du carbone ne signifie pas qu'une telle valeur préexiste à sa propre quête, qu'une valeur du carbone flotte dans le réel en attendant que l'oeil aguerré du chercheur ne la débusque. La valeur du carbone est une construction intellectuelle et devient réelle précisément parce qu'elle est construite. D'autant que la VSC est une entité conditionnelle. Son existence est relative à des croyances sur les états du monde futurs qui sont par définition contingents aujourd'hui et deviendront réels avec le passage du temps. Notre interprétation du mode d'existence de la VSC s'inspire des enseignements de l'anthropologie des sciences de Bruno Latour (*Latour*, 1999a) qui remet sur ses pieds l'épistémologie moderne et que nous présenterons dans le troisième chapitre. Au cours de cette traque de la valeur du carbone nous serons amenés à déterminer numériquement la trajectoire optimale des abattements de carbone, le profil de la valeur sociale du carbone, l'évolution du taux d'actualisation et à matérialiser également par des graphiques le rôle crucial de l'incertitude qui porte sur la sensibilité climatique.

Si peu de grands économistes ont le ridicule de prétendre que leurs résultats sont le reflet exact du réel et par conséquent que leurs prescriptions sont les solutions optimales à adopter, les valeurs produites par les modèles encadrent et structurent le débat public en fournissant une échelle de mesure raisonnable aux négociations qui précèdent les décisions. Les arguments chiffrés ont progressivement acquis un statut particulier dans l'arène politique (*Desrosières*, 1993) ainsi qu'une charge persuasive plus forte que la seule rhétorique du langage naturel. Les décideurs publics sont ainsi largement demandeurs de chiffres clés, d'évaluations monétaires percutantes pour étayer et justifier leurs positions politiques.

Mais ont-ils raison d'y croire? Remarquons qu'il est tout à fait possible qu'ils n'y croient pas du tout et qu'ils aient seulement recours à ces arguments économiques à des fins stratégiques. Mais en deça de ces considérations de *realpolitik*, serait-il rationnel pour les décideurs publics de suivre scrupuleusement les recommandations des économistes. S'il est établi par notre modèle que la valeur de la taxe carbone doit être égale à 20 dollars par tonne émise, fixer la véritable taxe dont devront s'acquitter les acteurs de l'économie réelle à ce niveau a-t-il un sens? Si la réalité de la taxe à 20 dollars est strictement circonscrite au modèle qui l'a produite alors quel lien pourrait-elle avoir avec l'économie réelle? et surtout quels seront ses effets? Intervient alors les questions des effets des théories économiques sur le monde et celle du rôle des

théories dans la conduite du débat public. Nous serons ainsi amenés à proposer une certaine vision de la "bonne place" de l'économiste et du "bon usage" pour la société des compétences et des connaissances de ce dernier. Deux visions s'affrontent. Une vision utopique ou béate : par ses capacités de calcul, et de rationalisation des problèmes seul l'économiste peut sauver le débat public du brouhaha irrationnel et des passions de la rue. Dès lors la bonne conduite politique consiste à transcrire dans l'économie réelle les solutions optimales qu'il a dégagées. Une vision réaliste et pragmatique que nous défendrons : ces mêmes capacités de calcul permettent à l'économiste de fournir une métrique et un langage commun aux acteurs du débat environnemental. Les modèles n'y sont pas considérés comme des copies du monde mais comme des mises en forme du monde, capables de cartographier les effets écologiques, économiques, distributifs de différentes positions politiques et éthiques, et ainsi de rendre comparables des arguments a priori incommensurables. L'économiste ne dicte pas la solution rationnelle mais assainit les termes de la négociation. Il occupe ainsi une place moins héroïque mais plus conforme à sa mission intellectuelle au sein de la division du travail scientifique.

Chapitre 1

Mise en évidence des composantes théoriques de la valeur sociale du carbone

La phase analytique de l'étude est la plus abstraite et la plus "mathématique". A partir de quelques catégories logiques telles que l'utilité, la temporalité, l'agrégation des préférences, l'équité, il s'agit de mettre en équations une représentation de l'économie affectée par l'externalité du carbone, l'objectif étant de clarifier les composantes du prix implicite du carbone ainsi que la forme du taux d'actualisation. Le problème est essentiellement abordé par une ACB qui vise la valeur quasi "métaphysique" du carbone, valeur qui existerait en soi, indépendamment du chercheur qui ne fait que la révéler. Dans la théorie marginaliste, une telle valeur représente la perte d'utilité engendrée par l'émission d'une unité supplémentaire de carbone lorsque le niveau de pollution est optimal, calculée en balançant les valeurs présentes des gains et des pertes intertemporels induits par l'externalité carbone. Une section de ce chapitre traitera de l'approche en ACE qui relève d'une conception plus "instrumentale" de la valeur du carbone puisque cette dernière dépend de l'objectif de concentration en carbone fixé lors d'un processus de négociation politique. La valeur reflète alors le coût de la contrainte que représente l'objectif de concentration et non la valeur en soi du carbone.

Les modèles sont présentés dans un ordre de complexité croissante afin de ne pas parasiter trop vite les interprétations par des paramètres qui rendent le modèle plus réaliste mais qui ne modifient pas fondamentalement son sens économique et physique. Cette complexité se traduit en fait par un raffinement des équations du cycle du carbone et des températures ((*Nordhaus*, 1992) puis (*Nordhaus et Boyer*, 1999)) et par l'introduction d'incertitude dans le modèle.

1.1 Le modèle simplifié en analyse coûts/bénéfices dans le cas certain

Le planificateur bienveillant se dote d'un critère utilitariste à maximiser qui s'écrit comme suit :

$$\text{Max} \sum_{t=0}^T N_t \theta^t u \left(\frac{C_t}{N_t} \right), \quad (1.1)$$

avec N_t la population en t et C_t la consommation de bien composite en t . Le facteur individuel d'escompte θ s'écrit en fait $\frac{1}{1+\rho}$, ρ étant le taux de préférence pure pour le présent.

On note $g_n(t)$ le taux de croissance de la population. Tant que ce taux est constant on peut écrire :

$$N_t = N_0(1 + g_n)^t.$$

Deux équation dynamiques traduisent l'accumulation du capital et le cycle du carbone :

$$K_{t+1} = K_t + (Y(K_t, L_t) - C_t - C_a(a_t) - D(m_t)) \quad (1.2)$$

$$m_{t+1} = (1 - \delta)m_t + \xi(1 - a_t)\sigma_t Y(K_t, L_t), \quad (1.3)$$

avec K_t le capital en t (on suppose que la dépréciation du capital est nulle), L_t le facteur travail dont la quantité est considérée ici comme exogène, $Y(\cdot)$ une fonction de production, $C_a(a_t)$ le coût d'abattement d'une fraction a_t des émissions, $D(m_t)$ le dommage induit par la concentration m_t de carbone dans l'atmosphère en t , δ une fraction de la concentration en carbone de l'atmosphère qui est transférée dans les océans à chaque période, ξ un coefficient de rétention du carbone dans l'atmosphère, et σ_t le paramètre d'intensité carbone de la production qui décroît avec le temps. L'équation du cycle du carbone est très rudimentaire et suppose qu'une fraction $1 - \xi$ de la concentration en carbone est éliminée naturellement du système à chaque période. Or, dans la réalité le carbone ne disparaît pas, une partie n'entre jamais dans l'atmosphère et on observe des phénomènes de transfert de carbone entre l'atmosphère et les océans. Le modèle complet intégrera ce mécanisme physique à partir d'un modèle théorique de diffusion.

Remarquons que les dommages et les coûts d'abattement sont introduits dans le modèle de telle façon qu'ils amputent une partie de la consommation. Concrètement, ils traduisent une consommation perdue. Les dommages se manifestent, soit par la destruction *ex post* d'une partie de la production,

soit par la baisse *ex ante* de la productivité du capital. Quant aux abattements des émissions, le niveau de cette variable n'est pas le fruit d'un choix d'investissement mais d'un choix entre deux types de consommation. Il ne s'agit pas de restreindre une partie de la consommation pour investir dans des technologies moins intensives en carbone mais de faire un usage différent de la production hors investissement. Les biocarburants fournissent un exemple simple et éclairant des usages alternatifs de la consommation. Une fois que le sucre est produit, il est possible, soit de le consommer par gourmandise, soit de s'en servir comme biocarburant. On suppose donc dans ce modèle qu'une telle substitution entre consommation et usage pour réduire les émissions de carbone est possible jusqu'à élimination totale des émissions. Cela rend le modèle plus tractable que si nous lui avions accolé une fonction spécifique dédiée à l'investissement en technologies à moindre intensité carbone.

Ajoutons que les émissions de carbone $\sigma_t Y(K_t, N_t)$ sont considérés dans le modèle comme un produit fatal. Quant aux conditions terminales sur le niveau des émissions, aucune solution pratique ne nous a paru tout à fait convaincante. Faut-il supposer qu'à partir d'une certaine date la concentration en carbone est constante (ce qui ne veut pas dire que les émissions sont nulles car il y a une part des émissions qui disparaît naturellement) ? Mais dès lors, quel niveau de concentration doit-on préférer ? Ou bien faut-il décider que les émissions sont nulles en dernière période bien que cela paraisse irréaliste puisqu'en dernière période les agents n'ont plus intérêt à faire d'effort ? Les réponses concrètes à ces questions relèvent davantage du bricolage à la discrétion du modélisateur que d'une démarche rigoureusement justifiée. C'est pourquoi nous avons choisi de laisser ces conditions terminales libres.

Enfin la contrainte sur les abattements s'écrit :

$$0 \leq a_t \leq 1.$$

1.1.1 Les conditions d'optimalité du problème

On pose le Lagrangien suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{L} = & \sum_{t=0}^T N_t \theta^t u \left(\frac{C_t}{N_t} \right) + \sum_{t=0}^{T-1} \lambda_t (m_{t+1} - (1 - \delta)m_t - \xi(1 - a_t)\sigma_t Y(K_t, L_t)) \\ & + \sum_{t=0}^T \gamma_t (K_{t+1} - K_t - (Y(K_t, L_t) - C_a(a_t) - D(m_t)) - C_t) \\ & + \sum_{t=0}^T \mu_t (1 - a_t). \end{aligned} \tag{1.4}$$

Les conditions de Khun-Tucker sur μ_t vérifient : si $0 < a_t < 1$ alors $\mu_t = 0$, et si $a_t = 1$ alors $\mu_t > 0$. Par commodité, nous nous bornons toujours à l'étude de la solution intérieure du problème, c'est-à-dire dans le cas où $0 < a_t < 1$.

Les conditions du premier ordre s'écrivent :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t}{N_t} \right) = \frac{\gamma_t}{\theta_t} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial m_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1} = \lambda_t(1 - \delta) + \gamma_t D'(m_t) \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_t \xi \sigma_t Y(K_t, L_t) = C a'(a_t) \gamma_t + \mu_t \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial K_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad Y'_K(K_t, L_t) \left(1 + \frac{\lambda_t \xi (1 - a_t) \sigma_t}{\gamma_t} \right) = \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} - 1 \quad (1.8)$$

1.1.2 Interprétation des résultats

Les économistes interprètent traditionnellement les multiplicateurs de Lagrange comme des prix "implicites". Ainsi, le multiplicateur γ_t représente le prix implicite du bien composite exprimé en unité d'utilité de la consommation et l'équation (1.6) traduit l'évolution du prix implicite du carbone λ_t , lui aussi exprimé en unité d'utilité de la consommation.

Le calcul des conditions du premier ordre met au jour les composantes du prix implicite du carbone. En effet, le prix du carbone en t dépend du prix du carbone en $t + 1$ appliqué à la part de la concentration de carbone qui demeure dans l'atmosphère après l'absorption naturelle d'une fraction δ par les océans, et du dommage marginal en $t + 1$ de la concentration en carbone de l'atmosphère. La différence entre le dommage marginal et cette fraction δ décide de la croissance ou de la décroissance du prix implicite de la tonne de carbone. D'où l'importance cruciale de l'évaluation des dommages et de la forme des fonctions de dommages qui sont retenues dans les modèles numériques de prospective économique.

D'autre part, l'équation (1.7) montre qu'à l'optimum le coût marginal d'abattement est égal, à chaque période, au prix des émissions additionnelles $\lambda_t \xi \sigma_t Y_t$. Cette équation propose ainsi une sorte de règle d'arbitrage entre émettre davantage ou abattre les émissions. En d'autres termes, à chaque période, il est optimal d'abattre les émissions de carbone jusqu'au point où le coût d'abattement de la dernière tonne de carbone est égal au prix des unités supplémentaires de carbone effectivement présent dans l'atmosphère. Remarquons que μ_t est nul tant que $a_t < 1$ et donc n'apparaît pas dans

l'interprétation de la solution intérieure du problème.

Interpréter les multiplicateurs de Lagrange comme des prix "implicites", que ce soit pour concéder une forme de modestie à l'économiste ou au contraire pour souligner les talents d'exégète de ce dernier, confère une épaisseur plus empirique à l'analyse. Il n'en demeure pas moins que cette traduction n'est pas neutre. Un prix a un sens économique et performe le monde en ceci qu'il représente un signal qui oriente les choix des agents économiques. C'est pourquoi à ce niveau agrégé de l'analyse nous préférons parler de valeur sociale du carbone. Les résultats des conditions du premier ordre sont exprimés en unités d'utilité. Or, l'utilité sociale n'a pas de prix mais possède une valeur. Ainsi, en toute rigueur, λ_t devrait exprimer la valeur sociale d'une unité de carbone évitée ou le coût social d'une unité émise. Il ne devient légitime de parler de prix qu'à partir de la décentralisation de l'optimum, quand une taxe est appliquée aux émissions de carbone. La taxe rend alors palpable, dans des termes monétaires, une réalité qui jusqu'à présent était exclue de la sphère marchande et du calcul économique. La taxe vise donc à confier au carbone son juste prix et à modifier le comportement des agents afin d'"internaliser l'externalité" selon l'expression consacrée.

1.1.3 Recherche du taux d'actualisation social

Le taux d'actualisation social se dérive de l'équation (1.8) et vaut $\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} - 1$. Selon la doctrine économique, à l'optimum, la productivité marginale du capital Y'_K coïncide avec le taux d'actualisation social. Ce taux prend en considération deux aspects, le taux de préférence pure pour le présent ρ , interprété comme le degré d'impatience d'une société; ainsi qu'un "effet richesse", composé par le produit du taux de croissance de la consommation par tête, g , et de l'élasticité intertemporelle de l'utilité marginale de la consommation ou courbure de l'utilité marginale de la consommation, τ . Ainsi le taux d'actualisation social est classiquement présenté sous la forme : $Y'_K = \rho + g\tau$. Le paramètre psychologique ρ renvoie à l'idée discutable qu'en deça de toute considération sur le niveau de la richesse future, sur la croissance économique, ou le rendement d'un investissement, la société préfère jouir d'un bien aujourd'hui plutôt que de retarder sa consommation. Le débat éthique sur le traitement des générations futures dans le calcul économique présent se concentre sur la légitimité ou non de donner à ce paramètre une valeur strictement positive. Tandis que le paramètre économique g décrit le fait que la société devient de plus en plus riche, le paramètre psychologique τ rappelle qu'une unité de richesse supplémentaire n'a pas le même poids en termes d'utilité pour un riche et pour un pauvre. Lorsque des modèles normatifs distinguent deux catégories d'agents (les riches et les pauvres) et ne maxi-

misent plus seulement l'utilité d'un agent représentatif mais l'utilité de ces deux groupes, τ est alors couramment interprété comme le degré d'aversion à l'inégalité de la société. Appliqué au changement climatique, le débat porte sur la possibilité d'une redistribution entre les générations, les générations futures étant les riches et les générations présentes les pauvres. Choisir un τ élevé revient à favoriser la redistribution des riches vers les pauvres, mais aussi à élever le niveau du taux d'actualisation social et donc à limiter les efforts d'investissements dans la lutte contre le changement climatique de la génération présente. On comprend dès lors pourquoi, ce taux aux apparences purement techniques est l'objet de querelles passionnées.

Dans ce problème nous avons retenu une fonction d'utilité à élasticité intertemporelle constante de la forme suivante :

$$u(x) = \frac{x^{1-\tau}}{1-\tau},$$

avec x la consommation.

D'où,

$$u'(x) = x^{-\tau}.$$

A l'aide d'une telle fonction, on retrouve bien le fait que τ représente l'élasticité intertemporelle de l'utilité marginale de la consommation puisqu'en effet :

$$\tau = -\frac{xu''(x)}{u'(x)}.$$

A partir de l'équation (1.5), on écrit :

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} = (1 + \rho) \frac{u'(\frac{C_{t-1}}{N_{t-1}})}{u'(\frac{C_t}{N_t})}.$$

En posant :

$$\frac{C_t}{N_t} = c_t,$$

on obtient,

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} = (1 + \rho) \left(\frac{u'(c_{t-1})}{u'(c_t)} \right) = (1 + \rho) \left(\frac{c_{t-1}}{c_t} \right)^{-\tau}.$$

Comme

$$\left(\frac{c_{t-1}}{c_t} \right)^{-\tau} = (1 + g_c)^\tau,$$

avec g_c le taux de croissance de la consommation par tête, et en acceptant le développement limité suivant :

$$(1 + g_c)^\tau = (1 + g_c\tau),$$

on peut écrire :

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} = (1 + \rho)(1 + g_c\tau).$$

En négligeant le produit $\rho g_c\tau$, on obtient :

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} = 1 + \rho + g_c\tau.$$

Donc, d'après (1.8) on a :

$$Y'_K(K_t, L_t) \left(1 + \frac{\lambda_t \xi (1 - a_t) \sigma_t}{\gamma_t} \right) = \rho + g_c\tau$$

On retrouve ainsi la forme canonique du taux d'actualisation. La prise en considération des émissions des carbone affecte la productivité marginale du capital puisque cette dernière est inférieure au taux d'actualisation sociale (puisque $\left(1 + \frac{\lambda_t \xi (1 - a_t) \sigma_t}{\gamma_t} \right) > 1$). L'égalité n'est rétablie que sous l'hypothèse d'arrêt des émissions (ce qui correspond à $a_t = 1$).

Remarquons toutefois qu'une incertitude pèse sur l'évolution du taux de croissance de la consommation par tête g_c dont la valeur dépend de l'évolution des coûts d'abattement et des dommages par tête, comme le montre l'équation suivante :

$$g_c = \frac{y_t - y_{t-1} - (c_a(a_t) - c_a(a_{t-1}) + d(m_t) - d(m_{t-1}))}{y_{t-1} - c_a(a_{t-1}) - d(m_{t-1})},$$

avec y_t le produit par tête, $c_a(a_t)$ le coût d'abattement par tête et $d(m_t)$ les dommages par tête. La question est alors de savoir dans quelle mesure le changement climatique affecte le taux de croissance de la consommation par tête. Pour calculer le taux d'actualisation, faut-il prendre le taux de croissance issu d'un scénario sans dommages climatiques (celui de la "baseline") ou bien opter pour un taux plus complexe qui intègre le changement climatique ? Il se peut que la part des coûts d'abattement et des dommages dans le produit total soit faible, voire négligeable, et donc que ces précautions méthodologiques ne soient pas nécessaires au calcul concret du taux d'actualisation. Seules des simulations numériques permettront dans le second chapitre de mettre au jour la sensibilité réelle du taux d'actualisation aux dommages et aux coûts d'abattement.

1.2 Recherche de l'équilibre décentralisé du problème

Après avoir mis au jour et commenté la dynamique du prix implicite du carbone qui prévaut à l'optimum, il convient pour le planificateur de veiller à ce que les agents économiques reçoivent les bons signaux pour réaliser des projets conformes à l'optimum. Il s'agit de comprendre comment l'optimum peut être décentralisé, c'est-à-dire atteint non plus théoriquement, mais par l'agrégation des comportements et décisions individuels des agents économiques. Il existe dans notre système économique simplifié deux types d'agents représentatifs : les entreprises et les ménages. Les premières produisent en louant du capital possédé par les ménages au taux r et paient une taxe sur leurs émissions de carbone au taux ω . Les seconds reçoivent les intérêts du capital, le profit des entreprises et le produit de la taxe sous forme forfaitaire. En revanche ils subissent les dommages environnementaux induits par les émissions de carbone, ce qui ampute une partie de leur consommation.

1.2.1 Le programme des entreprises

L'objectif des entreprises consiste à maximiser leur profit Π

$$\max_{K,a} \Pi_t = Y_t(K_t, L_t) - C_a(a_t) - r_t K_t - w_t L_t - \omega_t \xi (1 - a_t) \sigma_t Y_t(K_t, L_t) \quad (1.9)$$

avec r_t le taux d'intérêt, w_t le salaire des travailleurs et ω_t le taux de taxe appliqué aux émissions

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial a_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_t = \frac{C'_t(a_t)}{\xi \sigma_t Y_t(K_t, L_t)} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial K_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad Y'_K(K_t, L_t) = \frac{r_t}{1 - \omega_t \xi (1 - a_t) \sigma_t} \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial L_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad Y'_L(K_t, L_t) = w_t \quad (1.12)$$

En remplaçant (1.10) dans (1.7) on obtient que le taux de taxe optimale pour décentraliser l'optimum est : $\omega_t = \frac{\lambda_t}{\gamma_t}$. Rappelons que le prix implicite du carbone et le prix implicite du bien composite sont exprimés dans la même unité. C'est pourquoi leur ratio peut traduire sans ambiguïté un taux de taxe. En appliquant une telle taxe sur chaque tonne de carbone émise, le planificateur s'assure qu'il devient rentable pour les entreprises d'abattre une fraction d'équilibre a_t^* de leurs émissions (fraction que le planificateur

bienveillant ne peut calculer analytiquement). Si nul défaut de coordination entre acteurs économiques omniscients et parfaitement rationnels n'apparaissait, l'externalité carbone serait internalisée sans qu'il y ait besoin de recourir à une taxe contraignante, conformément au théorème de Coase. Mais en tant que bien public pur, le climat est vulnérable aux comportements de passager clandestin des acteurs qui n'ont pas intérêt de valoriser à son juste prix le carbone qu'ils émettent individuellement. Leur programme consistant seulement à maximiser leur profit individuel, il serait irrationnel d'y inclure les externalités. Ainsi, le planificateur bienveillant, en fixant une taxe envoie un signal économique qui les contraint à suivre le sentier optimal, à adopter le bon comportement en fonction du critère d'utilité sociale intertemporel qu'il a retenu. Cette affirmation ne vaut évidemment que si les agents réagissent rationnellement aux signaux qui leur sont envoyés. Or, dans la réalité, la détermination du niveau d'une taxe suit un processus politique complexe dans lequel interviennent parfois des économistes, nécessairement des décideurs publics et systématiquement des groupes de pression industriels, politiques et environnementaux. C'est pourquoi il y a un découplage totale entre la fixation du niveau de la taxe réelle et le niveau de la taxe pigouvienne. De ce fait l'égalisation des niveaux de ces deux taxes n'est que très peu probable. Et si la taxe optimale peut servir de repère intellectuel aux négociations, les réactions des acteurs qui y sont soumis ont peu de chance d'être exactement conformes à celles prédites par la théorie, en raison de la rationalité et des capacités de calcul limitées des acteurs et de la pluralité des déterminants de l'action (les agents économiques ne réagissent pas seulement en fonction de signaux prix).

En raison de la présence d'une taxe, l'équation (1.11) montre que la productivité marginale du capital $Y'_t(K_t, L_t)$ doit être supérieure au taux d'intérêt r pour que le profit de l'entreprise soit maximal (puisque $1 - \omega\xi(1 - a_t)\sigma_t < 1$). Ainsi, la taxation du carbone engendre un coût qui empêche l'entrepreneur de pousser la production jusqu'à l'égalisation de la productivité marginale du capital au taux d'intérêt. Il est ainsi contraint de "rationner" sa production (sous l'hypothèse de décroissance de la productivité marginale du capital).

1.2.2 Le programme des ménages

Les ménages cherchent à maximiser un critère d'utilité intertemporelle escomptée :

$$\text{Max} \sum_{t=0}^T H_t \theta^t u \left(\frac{C_t}{H_t} \right), \quad (1.13)$$

sous les contraintes :

$$K_{t+1} = K_t + I_t \quad (1.14)$$

$$C_t = \Pi_t + w_t L_t + r_t K_t + T_t - I_t - D(m_t). \quad (1.15)$$

H_t désigne ici la taille des ménages qui sont supposés croître au même taux que la population de sorte que les ménages sont au nombre de $\frac{N_t}{H_t}$ avec $H_t = (1 + g_n)^t$. T_t représente le produit de la taxe reçu par les ménages de façon forfaitaire ("lump sum"). L'équation (1.14) traduit la dynamique du capital sous l'hypothèse d'absence de dépréciation du capital. I_t représente l'investissement en t .

On pose le lagrangien suivant :

$$\mathbf{L} = \sum_{t=0}^T H_t \theta^t u \left(\frac{C_t}{H_t} \right) - \sum_{t=0}^{T-1} \gamma_t (C_t - \Pi_t - w_t L_t - r_t K_t - T_t + K_{t+1} - K_t + D(m_t)) \quad (1.16)$$

les conditions du premier ordre sont :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t}{H_t} \right) = \frac{\gamma_t}{\theta_t} \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial K_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} - 1 = r. \quad (1.18)$$

A partir de l'équation (1.18) il est aisé de retrouver le taux d'actualisation social. En effet,

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} = \frac{\theta_{t-1} u'(C_{t-1}/H_{t-1})}{\theta_t u'(C_t/H_t)}, \quad (1.19)$$

et comme là encore nous avons retenu une fonction d'utilité à élasticité intertemporelle constante, par les mêmes calculs que précédemment on obtient :

$$\frac{\gamma_{t-1}}{\gamma_t} - 1 = \rho + g_c \tau = r_t. \quad (1.20)$$

On retrouve ainsi la forme standard du taux d'actualisation social avec néanmoins un taux de croissance de la consommation par tête qui intègre les conséquences du changement climatique.

1.3 Le problème simplifié en analyse coûts/efficacité

Le planificateur bienveillant se dote cette fois d'une contrainte de concentration de carbone à ne pas dépasser. La fixation du niveau de cette contrainte est exogène et peut être issue d'un processus de négociations internationales du même type que celles qui ont débouché sur la signature du Protocole de Kyoto. A la différence de l'ACB, qui veut révéler la valeur du carbone en soi, la valeur du carbone qui découle de l'ACE est purement instrumentale. Elle n'a de sens et ne vaut que pour réaliser un objectif de concentration fixé. Le fondement de la valeur réside dans le processus politique alimenté par les discours scientifiques, les références éthiques et le jeu des groupes de pression, qui a présidé à la fixation de l'objectif. Dès lors, les dommages environnementaux sont supposés n'apparaître qu'à partir du dépassement du seuil de concentration autorisé. Au-delà de ce seuil, ils deviennent même, par définition, infinis. Le problème revient donc à minimiser les efforts de la société pour respecter la contrainte.

Le programme du planificateur se présente sous la forme d'une minimisation de coûts :

$$\text{Min} \sum_{t=0}^T \theta^t C_a(a_t) \quad (1.21)$$

Notons que dans ce cas θ est déjà le facteur social d'escompte.

Sous les contraintes :

$$m_{t+1} = (1 - \delta)m_t + \xi(1 - a_t)\sigma_t Y_t \quad (1.22)$$

$$m_t \leq \bar{m} \quad (1.23)$$

$$0 \leq a_t \leq 1. \quad (1.24)$$

On pose le Lagrangien suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{L} = & \sum_{t=0}^T \theta^t C_a(a_t) \\ & - \sum_{t=0}^{T-1} \lambda_t \theta^t (m_{t+1} - (1 - \delta)m_t - \xi(1 - a_t)\sigma_t Y_t) \\ & + \sum_{t=0}^T \beta_t (\bar{m} - m_t) + \sum_{t=0}^T \mu_t (1 - a_t). \end{aligned} \quad (1.25)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_t (\xi \sigma_t Y_t) = \theta^t C_a'(a_t) + \mu_t \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial m_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \lambda_{t-1} = (1 - \delta)\lambda_t & \text{quand } m_t < \bar{m} \\ \lambda_{t-1} = (1 - \delta)\lambda_t + \beta_t & \text{quand } m_t = \bar{m} \end{cases}$$

La seconde condition d'optimalité introduit une différence notable avec le problème en ACB. La dynamique du prix implicite du carbone ne dépend plus du dommage marginal des émissions puisque ces derniers sont considérés comme nuls jusqu'au niveau de concentration \bar{m} , mais elle fait émerger deux prix selon que la contrainte est atteinte ou pas. Avant que la contrainte ne soit atteinte le prix en $t - 1$ ne dépend que du prix en t déflaté de la part de la concentration en carbone de l'atmosphère qui est naturellement captée par les océans. Tandis qu'après que la contrainte est atteinte, quand $m = \bar{m}$, le prix implicite en $t - 1$ dépend de l'évolution du prix jusqu'à la contrainte et du prix γ_t qui mesure le poids de la contrainte. γ_t s'interprète comme le prix des efforts auxquels la société doit consentir pour ne pas dépasser la contrainte une fois qu'elle est atteinte. Ce prix est positif puisqu'il est raisonnable de penser qu'en l'absence de toute norme coercitive la trajectoire de l'économie dans un scénario "au fil de l'eau" aurait dépassé, au moins temporairement, la concentration autorisée.

Remarquons qu'il est difficile de montrer analytiquement à quelle date il est optimal que la contrainte soit atteinte.

En revanche, un calcul simple permet de décrire l'évolution de l'abattement une fois la contrainte atteinte. En remplaçant m_{t+1} et m_t par \bar{m} dans (1.22) on obtient :

$$a_t = 1 - \frac{\delta \bar{m}}{\xi \sigma_t Y_t}.$$

L'abattement devient nul quand les émissions en carbone qui alimentent effectivement la concentration en carbone de l'atmosphère sont exactement compensées par la part de la concentration en carbone captée naturellement par les océans.

Ainsi la présentation du problème en coût-efficacité a le mérite de révéler une autre forme de valeur sociale du carbone, qu'il faut absolument distinguer de celle dérivée du problème en ACB sous peine de s'exposer à de facheuses confusions. L'analyse de ces deux valeurs montre bien qu'elles renferment des composantes distinctes et donc, il est possible d'affirmer que leurs valeurs numériques respectives n'ont aucune raison d'être confondues. Or, la large fourchette d'évaluation de la valeur de la tonne du carbone que nous mentionnions en introduction s'explique en partie par les amalgames fréquents et regrettables qui sont faits entre ces deux types de valeur. C'est pourquoi avant de comparer deux valeurs, il convient de déterminer leur nature à partir du mode de calcul qui les a engendrées, sous peine de condamner la comparaison au non sens. Dans le troisième chapitre, une rapide revue de

la littérature nous permettra de revenir sur ce débat.

1.4 Introduction de l'incertitude dans le problème simplifié en analyse coûts/bénéfices

En introduisant de l'incertitude dans le problème simplifié, on franchit un premier pallier de complexité. L'incertitude porte sur la forme de la fonction de dommages (qui devient $d(\alpha_s, m_t)$) et sur l'évolution de la concentration en carbone de l'atmosphère. En revanche le cycle du carbone et la fonction d'émission restent inchangées. Pour traiter le problème, on considère trois états de la nature s et on suppose qu'il existe une date t_{info} à partir de laquelle on obtient de façon exogène l'information pertinente qui lève toute incertitude sur le "vrai" état de la nature dans lequel on se trouve.

Ainsi il faut distinguer deux périodes et la date précise t_{info} .

De t_0 à t_{info-1} on a :

$$m_{t+1} = (1 - \delta)m_t + \xi(1 - \bar{a}_t)\sigma_t Y_t \quad (1.27)$$

$$C_t^s = c(Y_t - Ca(\bar{a}_t) - D(\alpha_s, m_t)), \quad (1.28)$$

avec \bar{a}_t une fraction d'abattement donnée quels que soient les états de la nature, et c la propension marginale à consommer, considérée comme une donnée exogène dès lors que la dynamique du capital n'est plus intégrée au modèle. Pour simplifier, on considère également le produit Y_t comme exogène.

En t_{info} on a :

$$m_{t_{info}+1}^s = (1 - \delta)m_{t_{info}} + \xi(1 - \overline{a_{t_{info}}})\sigma_{t_{info}} Y_{t_{info}} \quad (1.29)$$

$$C_{t_{info}}^s = c(Y_{t_{info}} - Ca(\overline{a_{t_{info}}}) - D(\alpha_s, m_{t_{info}})). \quad (1.30)$$

De $t_{info} + 1$ à $T - 1$ on a pour tout s :

$$m_{t+1}^s = (1 - \delta)m_t^s + \xi(1 - a_t^s)\sigma_t Y_t \quad (1.31)$$

$$C_t^s = c(Y_t - Ca(a_t^s) - D(\alpha_s, m_t^s)). \quad (1.32)$$

1.4.1 Les conditions d'optimalité

On pose le lagrangien suivant :

$$\begin{aligned}
\mathbf{L} = & \sum_{s=1}^3 p_s \sum_{t=0}^{T-1} N_t \theta^t u \left(\frac{C_t^s}{N_t} \right) + \sum_{t=0}^{t_{info}-1} \lambda_t (m_{t+1} - (1 - \delta)m_t - \xi(1 - \bar{a}_t)\sigma_t Y_t) \\
& + \sum_{s=1}^3 \sum_{t=0}^{t_{info}-1} \gamma_t^s (c(Y_t - Ca(\bar{a}_t) - D(\alpha_s, m_t)) - C_t^s) + \sum_{t=0}^{t_{info}-1} \omega_t (1 - \bar{a}_t) \\
& + \lambda_{t_{info}}^s (m_{t_{info}}^s - (1 - \delta)m_{t_{info}}^s + \xi(1 - a_{t_{info}}^s)\sigma_{t_{info}} Y_{t_{info}}) \\
& + \gamma_{t_{info}}^s (c(Y_{t_{info}} - Ca(\bar{a}_{t_{info}}) - D(\alpha_s, m_{t_{info}})) - C_{t_{info}}^s) \\
& + \sum_{s=1}^3 \sum_{t=t_{info}+1}^{T-1} \lambda_t^s (m_{t+1}^s - (1 - \delta)m_t^s - \xi(1 - a_t^s)\sigma_t Y_t) \\
& + \sum_{s=1}^3 \sum_{t=t_{info}+1}^{T-1} \gamma_t^s (c(Y_t - Ca(a_t^s) - D(\alpha_s, m_t^s)) - C_t^s) \\
& + \sum_{s=1}^3 \sum_{t=t_{info}+1}^{T-1} \omega_t^s (1 - a_t^s). \tag{1.33}
\end{aligned}$$

Les conditions du premier ordre sont $\forall t$ et $\forall s$:

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t^s}{N_t} \right) = \frac{\mu_t^s}{\theta_t}, \tag{1.34}$$

en posant $\frac{\gamma_t^s}{p_s} = \mu_t^s$.
 $\forall t < t_{info}$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial m_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1} = (1 - \delta)\lambda_t + \sum_{s=1}^3 p_s \mu_t^s D'(\alpha_s, m_t) c \tag{1.35}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \bar{a}_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_t \xi \sigma_t Y_t = \sum_{s=1}^3 p_s \mu_t^s C'_a(\bar{a}_t) + \omega_t, \tag{1.36}$$

puis, $\forall t \geq t_{info} + 1$ et $\forall s$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial m_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Lambda_{t-1}^s = (1 - \delta)\Lambda_t^s + \mu_t^s D'(\alpha_s, m_t^s) c \tag{1.37}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Lambda_t^s \xi \sigma_t y_t = \mu_t^s C'_a(a_t^s) + \omega_t^s, \tag{1.38}$$

en posant $\Lambda_t^s = \frac{\lambda_t^s}{p_s}$.

Enfin en t_{info} on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial m_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t_{info}-1} = \sum_{s=1}^3 p_s \mu_{t_{info}}^s D'(\alpha_s, m_{t_{info}}^s) + \sum_{s=1}^{s=3} p_s \Lambda_{t_{info}}^s (1-\delta).$$

1.4.2 Interprétation des résultats

Comme l'incertitude est levée après la date t_{info} , ce qui se passe à la suite de cette date n'est pas différent du cas certain. Trois équations correspondant chacune aux trois états du monde décrivent alors l'évolution du prix implicite du carbone ainsi que le coût marginal d'abattement du carbone. C'est pourquoi elles n'appellent pas davantage de commentaires que ceux qui ont été faits précédemment.

En revanche, avant la date t_{info} , les effets de l'incertitude sont bien perceptibles au sein même des conditions d'optimalité et peuvent être interprétés. Remarquons que l'utilité marginale de la consommation est cette fois pondérée par les probabilités d'occurrence des différents états de la nature. Le changement de variable $\mu_t^s = \frac{\gamma_t^s}{p_s}$ est légitime puisqu'il n'affecte pas l'unité des variables et rend l'interprétation de l'équation (1.35) plus intuitive. En effet, cette équation fait apparaître que le prix d'une tonne de carbone en $t-1$ dépend, comme dans le cas certain, du prix du carbone en t appliqué à la part de cette tonne qui demeure dans l'atmosphère après l'absorption naturelle d'une fraction δ par les océans, et de l'espérance du dommage marginal en t d'une tonne émise en t $\sum_{s=1}^3 p_s D'(\alpha_s, m_t)$ que le multiplicateur μ_t^s transforme en unité d'utilité. Ainsi la différence avec le cas certain réside précisément dans l'apparition, lors de l'analyse, de cette espérance mathématique du coût des dommages en unité d'utilité de la consommation. Le calcul intègre ainsi différents scénarii du futur pour prescrire la trajectoire optimale dès aujourd'hui. Avant toute simulation numérique, l'analyse permet d'anticiper théoriquement, sans pouvoir les calculer exactement, les effets de l'introduction de l'incertitude dans le problème.

L'égalité (1.36) fait toujours état de la perte en unités d'utilité de la consommation liée à la présence de carbone dans l'atmosphère. Mais le coût marginal d'abattement $C'_a(\bar{a}_t)$ est cette fois multiplié par l'espérance mathématique du prix implicite du bien composite et traduit le fait que les dommages liés à la présence du carbone dans l'atmosphère sont incertains.

Enfin, en dérivant le lagrangien par rapport à $m_{t_{info}}$ on peut caractériser le prix implicite du carbone en $t_{info}-1$. Ce prix implicite est la somme de l'espérance des dommages en t_{info} et du coût espéré de la concentration en carbone de l'atmosphère en t_{info} après absorption d'une fraction δ par les océans.

1.4.3 Effet de l'incertitude sur le taux d'actualisation

En l'absence de dynamique du capital, le taux d'actualisation n'émerge pas spontanément. Quelques transformations calculatoires suffisent néanmoins à le caractériser.

Là encore il faut distinguer deux cas, avant et après t_{info} .

Après t_{info} la situation est semblable à celle du cas certain pour chaque état de la nature.

En posant $\Gamma_{t-1}^s = \frac{\lambda_{t-1}^s}{\mu_{t-1}^s}$ et en remplaçant dans (1.37) on obtient $\forall s$:

$$\Gamma_{t-1}^s = (1 - \delta)\Gamma_t^s \frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s} - \frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s} D'(\alpha_s, m_t^s),$$

$\frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s}$ s'interprétant comme le facteur d'actualisation.

Or,

$$\frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s} = \frac{\theta_t u'(C_t^s/N_t)}{\theta_{t-1} u'(C_{t-1}^s/N_{t-1})} = \frac{1}{1 + \rho} \frac{u'(c_t^s)}{u'(c_{t-1}^s)},$$

en posant $C_t^s/N_t = c_t^s$.

On utilise, là encore, une fonction d'utilité à élasticité intertemporelle constante. Ainsi,

$$\frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s} = \frac{1}{1 + \rho} \left(\frac{c_t^s}{c_{t-1}^s} \right)^{-\tau} = \frac{1}{1 + \rho} \left(\frac{1}{1 + g_c^s} \right),$$

avec g_c^s le taux de croissance de la consommation pour l'état de la nature s .

D'où,

$$\frac{\mu_t^s}{\mu_{t-1}^s} = \frac{1}{1 + \rho + g_c^s \tau}. \quad (1.39)$$

On retrouve bien la forme canonique du taux social d'actualisation $\rho + g_c^s \tau$.

Avant t_{info} l'exercice est plus délicat car l'équation (1.35) fait apparaître l'espérance du dommage marginal de la concentration en carbone de l'atmosphère. On note $E[.]$ l'opérateur d'espérance mathématique.

En posant :

$$\Gamma_{t-1} = \frac{\lambda_{t-1}}{E[\mu_t]}$$

et en remplaçant dans (1.35), on obtient :

$$\Gamma_{t-1} = (1 - \delta)\Gamma_t \frac{E[\mu_t]}{E[\mu_{t-1}]} + \frac{E[\mu_t D'(\alpha_s, m_t)]}{E[\mu_{t-1}]}$$

Les rapports d'espérances qui apparaissent dans l'équation $\frac{E[\mu_t]}{E[\mu_{t-1}]}$ et $\frac{E[\mu_t D'(\alpha_s, m_t)]}{E[\mu_{t-1}]}$ peuvent être interprétés comme une forme d'escompte d'utilité traduisant la

dynamique du prix implicite du carbone dans le cas incertain. Toutefois cette forme analytique ne permet pas de retrouver la formulation du taux d'actualisation en univers certain et le facteur d'actualisation s'écrit au mieux :

$$\frac{E[\mu_t]}{E[\mu_{t-1}]} = \frac{1}{1 + \rho} \frac{\sum_{s=0}^3 p_s u'(C_t^s/N_t)}{\sum_{s=0}^3 p_s u'(C_{t-1}^s/N_{t-1})}$$

A la différence du cas certain il n'est pas possible d'isoler, au sein de cette formule, le taux de croissance de la consommation. Le calcul de l'espérance d'utilité marginale de la consommation agrège et rend inséparables trois niveaux de consommation, correspondant au trois états de la nature.

1.5 Recherche de l'équilibre décentralisé dans le cas incertain

Après t_{info} les résultats sont les mêmes que dans le cas certain en distinguant bien les trois états de la nature. Avant t_{info} le programme des entreprises produit les conditions d'optimalité suivantes :

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial \bar{a}_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_t = \frac{C'_a(\bar{a}_t)}{\xi \sigma_t Y_t^s(K_t^s, L_t)} \quad (1.40)$$

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial K_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad Y'_K(K_t^s, L_t) = \frac{r_t}{1 - \omega_t \xi (1 - \bar{a}_t) \sigma_t Y_t^s(K_t^s, L_t)} \quad (1.41)$$

$$\frac{\partial \Pi_t}{\partial L_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad Y'_L(K_t^s, L_t) = w_t \quad (1.42)$$

Ainsi les mêmes commentaires que dans le cas certain s'appliquent sur ces résultats. Le programme de l'entreprise n'est pas fondamentalement modifié par l'introduction de l'incertitude puisqu'il n'intègre précisément pas les dommages sur lesquels porte l'incertitude. En revanche, les ménages sont affectés par les dommages puisque ces derniers amputent une partie de leur consommation. Seul le taux de taxe est affecté par l'incertitude avant t_{info} puisque $\omega = \frac{\lambda_t}{E[\mu_t]}$ en confrontant (1.36) et (1.40). Une fois l'incertitude levée, après t_{info} , les résultats sont identiques à ceux du cas certain pour chaque état de la nature. .

Avant t_{info} le programme des ménages consiste à maximiser un critère d'utilité intertemporelle escomptée pondéré par les probabilité d'occurrence des différents états de la nature :

$$\text{Max} \sum_{s=1}^3 p_s \sum_{t=0}^{t_{info}} H_t \theta^t u \left(\frac{C_t^s}{H_t} \right), \quad (1.43)$$

sous les contraintes :

$$K_{t+1}^s = K_t^s + I_t^s \quad (1.44)$$

$$C_t^s = \Pi_t + r_t K_t + T_t - I_t^s - d(\alpha_s, m_t). \quad (1.45)$$

L'équation (1.44) traduit la dynamique du capital sous l'hypothèse d'absence de dépréciation du capital. I_t^s représente l'investissement en t .

On pose le lagrangien suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{L} = & \sum_{s=1}^3 p_s \sum_{t=0}^{t_{info}} H_t \theta^t u \left(\frac{C_t^s}{H_t} \right) - \sum_{s=1}^3 \sum_{t=0}^{t_{info}-1} \gamma_t^s (C_t^s - \Pi_t - r_t K_t^s - T_t \\ & + K_{t+1}^s - K_t^s + d(\alpha_s, m_t)). \end{aligned} \quad (1.46)$$

Les conditions du premier ordre s'écrivent ainsi :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t^s}{N_t} \right) = \frac{\gamma_t^s}{\theta_t p_s} = \frac{\mu_t^s}{\theta_t} \quad (1.47)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial K_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sum_{s=1}^3 \gamma_{t-1}^s}{\sum_{s=1}^3 \gamma_t^s} - 1 = r_t, \quad (1.48)$$

ou encore,

$$r_t = \frac{E[\mu_{t-1}]}{E[\mu_t]} - 1. \quad (1.49)$$

La différence entre le ratio $\frac{E[\mu_{t-1}]}{E[\mu_t]}$ et 1 représente le taux d'actualisation social qui intègre l'incertitude. Il peut encore s'écrire sous la forme :

$$\frac{E[\mu_{t-1}]}{E[\mu_t]} - 1 = (1 + \rho) \frac{\sum_{s=0}^3 p_s u'(C_{t-1}^s / N_{t-1})}{\sum_{s=0}^3 p_s u'(C_t^s / N_t)} - 1.$$

1.6 Le modèle complet dans le cas certain en analyse coûts/bénéfices

Le modèle complet franchit le second pallier de complexité en introduisant un cycle du carbone à trois compartiments, plus réaliste mais aussi plus difficile à manier analytiquement, ainsi qu'une dynamique des température, absente du modèle simplifié. Les interprétations économiques qui en découlent sont inchangées, bien qu'elles s'appliquent cependant à des phénomènes physiques plus précis. Désormais que nous nous sommes familiarisés avec le modèle, la compréhension des résultats ne saurait être empêchée par la complexité relative du modèle.

Le critère à maximiser reste le même :

$$\max \sum_{t=0}^T N_t \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t u \left(\frac{C_t}{N_t} \right). \quad (1.50)$$

Pour ne pas surcharger les notations et les calculs, nous n'intégrons pas de dynamique du capital mais nous fixons un produit Y_t de façon exogène ainsi qu'un paramètre de propension marginale à consommer c , tel que la consommation se décompose comme suit :

$$C_t = c (Y_t - f(a_t, a_{t-1}, t) - D(\theta_t^{at}, t)).$$

La fonction f traduit le coût d'abattement du carbone en intégrant de l'inertie (*Ambrosi et al.*, 2003). La fonction de dommage dépend cette fois, non pas de la concentration en carbone, mais de l'accroissement de la température dans l'atmosphère θ_t^{at} .

Les équations de la dynamique du carbone à trois compartiments et de la dynamique de la température sont de la forme :

$$\mathbf{M}_{t+1} = \mathbf{C}_{trans} \mathbf{M}_t + (1 - a_t) E_t \mathbf{u} \quad (1.51)$$

$$\theta_{t+1} = \mathbf{B} \theta_t + \sigma_1 F_t(A_t) \mathbf{v}, \quad (1.52)$$

où,

$$\mathbf{M}_{t+1} = \begin{pmatrix} A_{t+1} \\ B_{t+1} \\ O_{t+1} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{trans} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ 0 & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a_{21} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & 1 - a_{12} - a_{23} & a_{32} \\ 0 & a_{23} & 1 - a_{32} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

\mathbf{C}_{trans} représente la matrice de transfert dans le modèle de Nordhaus à trois compartiments (*Nordhaus et Boyer*, 1999). A_t est la concentration en carbone dans l'atmosphère en t , tandis que A_{PI} représente la concentration en carbone dans l'atmosphère à l'époque pré-industrielle (fixée à 280 ppm). B_t est la

concentration en carbone de la biosphère et de la couche superficielle de l'océan en t . O_t est la concentration en carbone de la couche profonde de l'océan en t . E_t représente les émissions de carbone de la baseline en t (elles sont donc exogènes). \mathbf{u} et \mathbf{v} sont deux vecteurs colonnes.

Il nous reste à présenter plus précisément l'équation de forçage radiatif F_t et la matrice \mathbf{B} de la dynamique des températures.

$$F_t(A_t) = F_{2x} \frac{\log(A_t/x)}{\log 2}, \text{ et,}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 - \sigma_1(\lambda + \sigma_2) & \sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_3 & 1 - \sigma_3 \end{pmatrix},$$

où λ est un paramètre de réponse climatique qui permet de faire le lien entre la concentration en carbone de l'atmosphère et la hausse de température équivalente. A l'équilibre, lorsque la température est stationnaire, la sensibilité climatique est décrite par l'équation :

$$\lambda = \frac{F_{2x}}{\theta_{2x}^{at}},$$

avec F_{2x} un paramètre de forçage radiatif instantané pour un doublement de la concentration en carbone de l'atmosphère préindustrielle x et θ_{2x}^{at} la hausse de la température de l'atmosphère induite par ce même doublement de la concentration en carbone de l'atmosphère. Dans la suite du problème nous remplacerons systématiquement λ par $\frac{F_{2x}}{\theta_{2x}^{at}}$.

L'équation d'évolution de la température peut encore s'écrire de façon plus éclairante sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \theta_t^{at} \\ \theta_t^{oc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1(-\frac{F_{2x}}{\theta_{2x}^{at}}\theta_t^{at} - \sigma_2\phi_T + F_t(A_t)) \\ \sigma_3\phi_T \end{pmatrix},$$

avec, θ_t^{oc} l'accroissement de la température de l'océan, ϕ_T la différence entre θ_t^{at} et θ_t^{oc} , et enfin $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ des coefficients paramétrés de telle sorte qu'ils reproduisent simplement des phénomènes climatiques complexes.

1.6.1 Les conditions d'optimalité

On pose le langrangien suivant :

$$\begin{aligned}
\mathbf{L} = & \sum_{t=0}^T \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t N_t u \left(\frac{C_t}{N_t} \right) \\
& + \sum_{t=0}^{T-1} (\lambda_t^{at}, \lambda_t^{bio}, \lambda_t^{oc}) \begin{pmatrix} A_{t+1} - (c_{11}A_t + c_{12}B_t + (1-a_t)E_t) \\ B_{t+1} - (c_{21}A_t + c_{22}B_t + c_{23}O_t) \\ O_t - (c_{32}B_t + c_{33}O_t) \end{pmatrix} \\
& + \sum_{t=0}^T \gamma_t (c(Y_t - f(a_t, a_{t-1})) - D(\theta_t^{at})) - C_t \\
& + \sum_{t=0}^T (\omega_t^{at}, \omega_t^{oc}) \begin{pmatrix} \theta_{t+1}^{at} - (1 - \sigma_1(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x}^{at}} + \sigma_2))\theta_t^{at} + 1 - \sigma_3\theta_t^{oc} + \sigma_1 F_t(A_t) \\ \theta_{t+1}^{oc} - (\sigma_3\theta_t^{at} + (1 - \sigma_3)\theta_t^{oc}) \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{1.53}$$

Les conditions d'optimalité :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t}{N_t} \right) = \frac{\gamma_t}{\left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t} \tag{1.54}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial A_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1}^{at} = c_{11}\lambda_t^{at} + c_{12}\lambda_t^{bio} + \omega_t^{at}\sigma_1 F_t'(A_t) \tag{1.55}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial B_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1}^{bio} = c_{21}\lambda_t^{at} + c_{22}\lambda_t^{bio} + c_{23}\lambda_t^{oc} \tag{1.56}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial O_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1}^{oc} = c_{32}\lambda_t^{bio} + c_{33}\lambda_t^{oc} \tag{1.57}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_t^{at} E_t = \gamma_t f_1'(a_t, a_{t-1}) + \gamma_{t+1} f_2'(a_{t+1}, a_t) \tag{1.58}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta_t^{at}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_{t-1}^{at} = \omega_t^{at} \left(1 - \sigma_1 \left(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x}^{at}} + \sigma_2 \right) \right) + \omega_t^{oc} \sigma_3 + \gamma_t c D'_{\theta_{at}} \tag{1.59}$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta_t^{oc}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_{t-1}^{oc} = \omega_t^{at} \sigma_3 + \omega_t^{oc} (1 - \sigma_3) \tag{1.60}$$

1.6.2 Interprétation des résultats

L'équation (1.55) traduit la dynamique du prix implicite du carbone présent dans l'atmosphère. Le prix λ_{t-1}^{at} exprimé en unité d'utilité de la consommation dépend d'une pondération des prix implicites du carbone dans l'atmosphère et dans la biosphère en t ainsi que du prix de la hausse de la

température de l'atmosphère ω_t^{at} liée à A_t . La fonction F'_t mesurant la hausse de température de l'atmosphère induite par l'accroissement marginal de la concentration en carbone. Les deux équations qui suivent décrivent respectivement les dynamiques du prix du carbone dans la biosphère et dans l'océan. L'introduction d'un cycle du carbone à trois compartiments met ainsi au jour les interactions de trois prix implicites du carbone associées aux phénomènes physiques du cycle du carbone.

L'équation (1.58) montre qu'à l'optimum le coût des émissions est égal au coût marginal d'abattement. L'équation permet ainsi d'effectuer un arbitrage entre émettre davantage et abattre. En raison de l'introduction d'inertie dans la fonction du coût d'abattement, l'arbitrage prend en considération le coût marginal d'abattement en t ainsi qu'en $t + 1$ à la différence du cas simplifié dans lequel ce phénomène d'inertie n'intervenait pas.

L'équation (1.59) analyse le prix d'une hausse de la température en $t - 1$, exprimé en unité d'utilité de la consommation, comme la somme, pondérée par des paramètres physiques, du prix de la hausse de la température dans l'atmosphère en t et du prix de la hausse de la température dans l'océan, à laquelle s'ajoute le dommage marginal en t induit par la hausse de la température dans l'atmosphère.

Enfin le prix de la hausse de la température dans l'océan se présente comme la somme pondérée des hausses de températures de l'atmosphère et de l'océan.

Le modèle complet, bien qu'il soit plus complexe dans sa formulation, fait émerger des résultats très proches de ceux du modèle simplifié, en donnant une intuition plus juste des véritables phénomènes physiques qui déterminent le cycle du carbone et l'évolution de la température.

1.7 Le modèle complet dans le cas incertain en ACB

L'incertitude introduite dans le modèle complet apporte le dernier cran de complexité à cette analyse. L'incertitude porte précisément sur la sensibilité climatique $\theta_{2x,at}^s$. On suppose qu'à la date t_{info} l'incertitude est levée.

Avant t_{info} , quels que soient les états de la nature $a_t = \bar{a}_t$. Après t_{info} la fonction des coûts d'abattement devient $f(a_t^s, a_{t-1}^s)$.

Ce qui se passe en t_{info} doit faire l'objet d'un traitement isolé. Les dyna-

miques des températures et des concentrations en t_{info} s'écrivent :

$$\begin{pmatrix} A_{t_{info}+1}^s \\ B_{t_{info}+1}^s \\ O_{t_{info}+1}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}A_{t_{info}} + c_{12}B_{t_{info}} + \delta(1 - \overline{a_{t_{info}}})em_{t_{info}} \\ c_{21}A_{t_{info}} + c_{22}B_{t_{info}} + c_{23}O_{t_{info}} \\ c_{32}B_{t_{info}} + c_{33}O_{t_{info}} \end{pmatrix},$$

et

$$\begin{pmatrix} \theta_{t_{info}+1,at}^s \\ \theta_{t_{info}+1,oc}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - \sigma_1(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2))\theta_{t_{info}}^{at} + (1 - \sigma_3)\theta_{t_{info}}^{oc} + \sigma_1 F_{t_{info}}(A_{t_{info}}) \\ \sigma_3\theta_{t_{info}}^{at} + (1 - \sigma_3)\theta_{t_{info}}^{oc} \end{pmatrix}$$

1.7.1 Les conditions d'optimalité

On pose le lagrangien suivant :

$$\begin{aligned}
\mathbf{L} = & \sum_{s=0}^3 p_s \sum_{t=0}^{T-1} \frac{1}{(1+\rho)^t} N_t u \left(\frac{C_t^s}{N_t} \right) \\
& + \sum_{t=0}^{t_{info}-1} (\lambda_t^{at}, \lambda_t^{bio}, \lambda_t^{oc}) \begin{pmatrix} A_{t+1} - (c_{11}A_t + c_{12}B_t + \delta(1-\bar{a}_t)E_t) \\ B_{t+1} - (c_{21}A_t + c_{22}B_t + c_{23}O_t) \\ O_t - (c_{32}B_t + c_{33}O_t) \end{pmatrix} \\
& + \sum_{s=0}^3 \sum_{t=0}^{t_{info}-1} \gamma_t^s (c(Y_t - f(\bar{a}_t, \bar{a}_{t-1})) - D(\theta_{at,t}^s)) - C_t^s \\
& + \sum_{s=0}^3 \sum_{t=0}^{t_{info}-1} (\omega_{at,t}^s, \omega_{oc,t}^s) \begin{pmatrix} \theta_{at,t+1}^s - ((1 - \sigma_1(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2))\theta_{at,t}^s + 1 - \sigma_3\theta_{oc,t}^s + \sigma_1 F_t(A_t)) \\ \theta_{oc,t+1}^s - (\sigma_3\theta_{at,t}^s + (1 - \sigma_3)\theta_{oc,t}^s) \end{pmatrix} \\
& + (\lambda_{at,t_{info}}^s, \lambda_{bio,t_{info}}^s, \lambda_{oc,t_{info}}^s) \begin{pmatrix} A_{t_{info}+1}^s - (c_{11}A_{t_{info}} + c_{12}B_{t_{info}} + \delta(1 - \bar{a}_{t_{info}})em_{t_{info}}) \\ B_{t_{info}+1}^s - (c_{21}A_{t_{info}} + c_{22}B_{t_{info}} + c_{23}O_{t_{info}}) \\ O_{t_{info}+1}^s - (c_{32}B_{t_{info}} + c_{33}O_{t_{info}}) \end{pmatrix} \\
& + (\omega_{at,t_{info}}^s, \omega_{oc,t_{info}}^s) \begin{pmatrix} \theta_{t_{info}+1,at}^s - ((1 - \sigma_1(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2))\theta_{t_{info}}^{at} + (1 - \sigma_3)\theta_{t_{info}}^{oc} + \sigma_1 F_{t_{info}}(A_{t_{info}})) \\ \theta_{t_{info}+1,oc}^s - (\sigma_3\theta_{t_{info}}^{at} + (1 - \sigma_3)\theta_{t_{info}}^{oc}) \end{pmatrix} \\
& + \gamma_{t_{info}}^s (c(Y_{t_{info}} - f(\bar{a}_{t_{info}}, \bar{a}_{t_{info}-1})) - D(\theta_{at,t_{info}}^s)) - C_{t_{info}}^s \\
& + \sum_{s=0}^3 \sum_{t=t_{info}+1}^T (\lambda_{t,at}^s, \lambda_{t,bio}^s, \lambda_{t,oc}^s) \begin{pmatrix} A_{t+1}^s - (c_{11}A_t^s + c_{12}B_t^s + \delta(1 - a_t^s)E_t) \\ B_{t+1}^s - (c_{21}A_t^s + c_{22}B_t^s + c_{23}O_t^s) \\ O_{t+1}^s - (c_{32}B_t^s + c_{33}O_t^s) \end{pmatrix} \\
& + \sum_{s=0}^3 \sum_{t=t_{info}+1}^T \gamma_t^s (c(Y_t - f(a_t^s, a_{t-1}^s)) - D(\theta_{at^s,t})) - C_t^s \\
& + \sum_{s=0}^3 \sum_{t=t_{info}}^T (\omega_{t,at}^s, \omega_{t,oc}^s) \begin{pmatrix} \theta_{t+1,at}^s - ((1 - \sigma_1(\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2))\theta_{t,at}^s + (1 - \sigma_3)\theta_{t,oc}^s + \sigma_1 F_t(A_t^s)) \\ \theta_{t+1,oc}^s - (\sigma_3\theta_{t,at}^s + (1 - \sigma_3)\theta_{t,oc}^s) \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

Les conditions d'optimalité : $\forall t$ et $\forall s$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial C_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad u' \left(\frac{C_t^s}{N_t} \right) = \frac{\mu_t^s}{\left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t}. \quad (1.63)$$

$\forall t < t_{info}$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_t^{at} E_t = E[\mu_t^s] f_1'(\bar{a}_t, \bar{a}_{t-1}) + E[\mu_{t+1}^s] f_2'(\bar{a}_{t+1}, \bar{a}_t) \quad (1.64)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial A_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Lambda_{t-1}^{at} = c_{11} \Lambda_t^{at} + c_{12} \Lambda_t^{bio} + \sum_{s=0}^3 \Omega_{at,t}^s \sigma_1 F_t'(A_t) \quad (1.65)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial B_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1}^{bio} = c_{21} \lambda_t^{at} + c_{22} \lambda_t^{bio} + c_{23} \lambda_t^{oc} \quad (1.66)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial O_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1}^{oc} = c_{32} \lambda_t^{bio} + c_{33} \lambda_t^{oc}, \quad (1.67)$$

Avec $\mu_t^s = \frac{\gamma_t^s}{p_s}$, $\Lambda_t^{at} = \frac{\lambda}{p_s}$ et $\Omega_{at,t}^s = \frac{\omega_{at,t}^s}{p_s}$. $\forall s$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta_{at,t}^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Omega_{at,t-1}^s = \Omega_{at,t}^s (1 - \sigma_1 (\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2)) + \Omega_{oc,t}^s \sigma_3 + \mu_t^s c D'(\theta_{at,t}^s) \quad (1.68)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta_{oc,t}^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_{at,t-1}^s = \omega_{at,t}^s \sigma_1 \sigma_2 + \omega_{oc,t}^s (1 - \sigma_3) \quad (1.69)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial a_t^s} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t,at}^s \delta E_t = \gamma_t^s f_1'(a_t^s, a_{t-1}^s) + \gamma_{t+1}^s f_2'(a_{t+1}^s, a_t^s). \quad (1.70)$$

$$(1.71)$$

Pour tout $t > t_{info}$ on a :

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial A_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1,at}^s = c_{11} \lambda_{t,at}^s + c_{12} \lambda_{t,bio}^s + \omega_{t,at}^s \sigma_1 F_t'(A_t) \quad (1.72)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial B_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1,bio}^s = c_{21} \lambda_{t,at}^s + c_{22} \lambda_{t,bio}^s + c_{23} \lambda_{t,oc}^s \quad (1.73)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial O_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_{t-1,oc}^s = c_{32} \lambda_{t,bio}^s + c_{33} \lambda_{t,oc}^s \quad (1.74)$$

Que se passe-t-il en t_{info} ? En dérivant par rapport à $A_{t_{info}}$ on obtient la valeur du prix implicite du carbone présent dans l'atmosphère.

$$\lambda_{t_{info}-1}^{at} = E[\mu_{t_{info},at}] c_{11} + E[\mu_{t_{info},oc}] c_{21} + E[\Omega_{t_{info},at}^s] \sigma_1 F_{t_{info}}'(A_{t_{info}}) \quad (1.75)$$

En dérivant par rapport à $\theta_{at,t_{info}}^s$ on obtient la valeur du prix implicite de la température de l'atmosphère.

$$\theta_{at,t_{info}-1}^s = E[\Omega_{at,t_{info}}] 1 - \sigma_1 (\frac{F_{2x}}{\theta_{2x,at}^s} + \sigma_2) + E[\Omega_{oc,t_{info}}] 1 - \sigma_3 + c E[\mu_{t_{info}}] D'(\theta_{at,t_{info}}) \quad (1.76)$$

1.7.2 Interprétation des résultats

Après la levée de l'incertitude, les résultats sont identiques à ceux du cas certain ; trois prix implicites du carbone et de la température, correspondant aux trois états de la nature, apparaissent.

En revanche avant t_{info} , l'incertitude introduit des espérances mathématiques des prix implicites du bien composite $E[\mu_t^s]$ et de la température de l'atmosphère $E[\omega_t^s]$.

L'intérêt heuristique de détailler le modèle complet ne consistait pas à apporter un éclairage nouveau sur les intuitions économiques tirées de l'analyse du modèle simplifié mais à faire la transition entre la partie analytique et la partie numérique qui reprend exactement la forme du modèle complet. Ce modèle plus réaliste a permis de lancer une passerelle vers le monde et de donner une intuition plus tangible des mécanismes physiques qui vont désormais être calibrés à l'aide de données empiriques. Il s'agira alors non plus de démêler les composantes des prix implicites mais d'en déterminer la trajectoire, de produire des valeurs numériques, de faire parler le modèle en somme.

Chapitre 2

Les résultats numériques du modèle : à la recherche de la "vraie" valeur sociale du carbone

Au cours de cette phase numérique, la quête de la valeur sociale du carbone trouve son aboutissement. A l'issue d'un long et patient dialogue avec l'ordinateur, l'économiste sera en mesure de brandir sa vraie valeur de la tonne de carbone, celle qui doit prévaloir dans les négociations environnementales, dans le calcul économique public ou dans les calculs de rentabilité des investissements "écologiquement responsables". Bardé de graphiques et de courbes, l'économiste arme son argumentaire pour justifier le bien-fondé de sa trouvaille au sein des cercles d'experts et plus largement au sein du débat public.

Les limites de l'analyse se trouvent surmontées par un outil domesticable qui joue le rôle de "passeur" entre la mise au jour des composantes théoriques du prix implicite du carbone et son évaluation monétaire concrète, ayant un sens pertinent pour les acteurs de l'économie réelle.

Les valeurs produites par le modèle numérique sont contraintes par les données empiriques qui y sont injectées. Or, de telles données tirent leur nom d'une convention tacite qui en fonde la réalité ou plutôt leur rapport avec la réalité. Ce qui est désigné communément comme des "données empiriques" s'apparente bien plus à des "obtenues" qu'à des pures éléments tirés du réel. Un consensus s'est établi pour admettre, par exemple, que le PIB par habitant représentait une donnée empirique, une mesure raisonnable de la richesse d'un pays en dépit des nombreuses critiques qui ont été émises à l'égard de cet indicateur (*Gadrey et Jany-Catrice, 2005*). Ainsi, introduire

des données empiriques devient suspect et revient sans doute à introduire une part d'arbitraire. Tandis que la méthode analytique, par son haut degré d'abstraction, ne préjugerait pas des formes concrètes du réel et sa plasticité lui assurerait une plus grande cohérence avec la réalité, et donc une plus grande généralité. Foin des vérités circonstanciées, la science est affaire d'universel! Mais l'ambition scientifique maximaliste qui réside derrière ce jugement péremptoire ne doit occulter ni sa mauvaise foi intellectuelle (la démarche de l'économie "analytique" est loin d'être exempte d'arbitraire), ni son irréalisme épistémologique (nous reviendrons plus précisément sur cet aspect dans le troisième chapitre).

En deça de ces querelles d'école, notre posture est, à ce stade de l'étude, beaucoup plus pragmatique : si le but de la recherche est de fournir une valeur raisonnable de la tonne de carbone alors l'existence d'une méthode numérique pour y parvenir est une aubaine dont le chercheur doit se saisir. Il paraît naturel qu'une telle méthode prenne le relais de l'analyse, une fois que cette dernière a épuisé toutes ses ressources heuristiques. Les deux méthodes sont considérées comme complémentaires, nulle hiérarchie n'est établie *a priori*.

2.1 Spécification du modèle

Pour passer de l'analyse mathématique à la résolution numérique l'économiste doit donner aux paramètres et aux fonctions mathématiques abstraites une consistance empirique. Il s'agit de spécifier leur forme à l'aide d'arguments élémentaires dont la valeur est connue. Ces arguments élémentaires sont les données empiriques qui fondent le modèle.

2.1.1 Forme générale de la valeur sociale du carbone

Pour le calcul de la valeur de la tonne de carbone, nous utilisons la forme du prix implicite du carbone mise en évidence dans le premier chapitre telle que :

$$\lambda_t^{at} = \frac{\gamma_t f'_1(a_t, a_{t-1}) + \gamma_{t+1} f'_2(a_{t+1}, a_t)}{E_t}. \quad (2.1)$$

λ_t^{at} représentait alors le prix implicite du carbone, γ_t et γ_{t+1} les prix implicites de la consommation et $f(a_t, a_{t-1})$ la fonction de coûts d'abattement avec inertie. Exprimée ainsi la VSC demeure une forme mathématique très générale, mais après avoir spécifié ses composantes et lancé la résolution numérique du problème, elle revêtera toute l'épaisseur d'une valeur exprimée en dollars par tonne.

La forme de γ_t a déjà été déterminée au cours de l'analyse théorique et se déduit de l'équation suivante :

$$u' \left(\frac{C_t}{N_t} \right) = \frac{\gamma_t}{\left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t}.$$

En prenant une fonction d'utilité logarithmique à élasticité intertemporelle constante on obtient :

$$\gamma_t = \frac{1}{c_t} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t.$$

Tous les arguments de l'équation sont connus puisque ρ , le taux de préférence pure pour le présent est fixé à 2% et c_t , la consommation par tête est une variable du modèle calculée de façon endogène.

La spécification de la fonction des coûts d'abattement quant à elle, oblige le modélisateur à faire des hypothèses fortes sur le progrès technique ou le coût des technologies utilisées. Cette fonction technico-économique est nécessairement irréaliste mais tente d'intégrer simplement le progrès technique et les coûts induit par le passage d'une structure économique intensive en carbone à une structure moins intensive en carbone, ou en d'autres termes les coûts l'inertie du système productif.

Elle se présente sous la forme suivante (*Ambrosi et al.*, 2003) :

$$f(a_t, a_{t-1}) = BK.PT_t. \left(\frac{a_t^2}{2} + \xi^2(a_t - a_{t-1})^2 \right). E_t,$$

avec BK , le coût marginal de la *backstop technology*, le procédé technique qui permet d'abattre totalement les émissions de carbone. Un tel procédé est supposé disponible à chaque instant à un prix pouvant cependant être très élevé. Un facteur autonome de progrès technique fait décroître le prix de la *backstop* au rythme de 1% par an. On suppose toutefois que le prix ne peut descendre en deçà de 25% de sa valeur initiale. D'où, $PT_t = 0.25 + 0.75e^{-0.01\delta t}$ où δ est le pas de temps du modèle (dix ans). Le facteur d'inertie socio-économique $\xi(a_t - a_{t-1})^2$ pénalise la vitesse à laquelle les abattements sont réalisés. Si la fraction d'abattement est la même d'une période sur l'autre alors ce facteur n'intervient pas et seul le coût instantané $\frac{a_t^2}{2}$ compte. Si cette fraction croît avec le temps alors le facteur d'inertie socio-technique prend une valeur positive qui alourdit le coût total de l'abattement. La pénalisation de la vitesse de l'abattement se justifie par le coût induit par le remplacement trop précoce d'un capital non amorti par un capital moins intensif en carbone. Enfin, E_t représente les émissions de CO_2 en t dans un scénario "au fil de l'eau" et a_t , les abattements réalisés en t.

2.1.2 Spécification du modèle climatique et des fonctions de dommages retenues

En ce qui concerne le modèle climatique sous-jacent à notre étude, nous utilisons le cycle du carbone de Nordhaus à trois compartiments (atmosphère, biosphère+surface de l'océan et océan profond) (*Nordhaus et Boyer, 1999*), ainsi qu'un modèle du cycle des températures que nous avons déjà présentés dans la dernière sous-partie du premier chapitre. Ce modèle est introduit comme une donnée au sein de nos calculs. Toute l'incertitude se concentre sur la sensibilité climatique. L'intérêt du modèle intégré consiste à repérer comment l'incertitude se propage sur les variables économiques telles que la VSC et le TSA. Les résultats numériques seront interprétés à l'aune des hypothèses faites sur les paramètres et les fonctions économiques.

Les fonctions de dommages sont de deux types, quadratique et sigmoïdale.

La fonction quadratique est de la forme :

$$D_q(\theta_{at}^t) = a(\theta_{at}^t)^2 Y_t,$$

avec q pour signifier que la fonction est quadratique, θ_t la hausse de la température par rapport à la température préindustrielle, $a = 0.5\%$ et Y_t le produit.

La fonction sigmoïdale est de la forme :

$$D_s(\theta_{at}^t) = \left(\frac{d}{1 + ((2 - e)/e)(K + Z - 2\theta_{at}^t)/(K - Z)} \right) Y_t,$$

avec $d = 4\%$, correspondant à la hauteur du saut de la fonction et donc à la taille des dommages possibles, $e = 0.01$, représentant l'amplitude du virage, $Z=1.7\text{ K}$, $K=2.3\text{ K}$, définissant l'intervalle de hausse de la température pendant lequel l'effet de seuil de la fonction de dommages peut se déclencher.

Le choix de ces deux types de fonctions de dommages traduit le fait que la forme réelle des dommages demeure largement incertaine et toute spécification d'une telle fonction est en partie arbitraire. L'intérêt de la démarche réside dans la possibilité de mesurer la sensibilité des résultats à la forme de la fonction de dommages.

2.1.3 Surprise climatique et taux d'actualisation

Pour prendre en considération l'incertitude forte qui porte sur la forme de la fonction de dommages et sur la sensibilité climatique, une solution numérique consiste à mener une analyse de sensibilité des résultats. Nous avons ainsi fait tourner séparément des modèles avec des fonctions de dommages

différentes (quadratique ou sigmoïdale) et intégrant des sensibilités climatiques différenciées. Pour appréhender les effets de surprises climatiques, qui sont très souvent écartés du calcul sans justification (*Godard, 2007*), sur la trajectoire des abattements, nous avons lancé des modèles qui rendent crédibles l'existence de tels phénomènes. Techniquement cela revient à alourdir la queue de distribution des probabilités sur les différents états du monde, en donnant une probabilité non nulle (ici 0.166) à une catastrophe climatique.

L'autre versant de la recherche a porté sur les effets du changement climatique sur le taux d'actualisation. Il s'agit de confirmer ou d'infirmer à l'aide de simulations numériques l'intuition analytique de M. Weitzman (*Weitzman, 2007a*) selon laquelle les effets de l'incertitude l'emporteraient sur ceux du taux d'actualisation, ce dernier pouvant prendre une valeur infinie. Pour ce faire, nous avons comparé les taux d'actualisation de nos différents modèles avec changement climatique et celui de la "baseline" dans lequel aucun dommage n'apparaît.

Si notre modèle a été conçu pour répondre à un programme scientifiques ambitieux, nous n'avons pas encore eu le temps d'en exploiter toutes les ressources. C'est pourquoi, dans le cadre de ce mémoire, nous choisissons de ne présenter que les résultats jugés comme les plus saillants.

2.1.4 Stratégie numérique de recherche

Dans un premier temps nous avons tenté d'écrire un modèle dynamique intégré qui reproduise des trajectoires d'abattement du carbone, des niveaux de coûts d'abattement ou de dommage en pourcentage du PIB plausibles, c'est-à-dire compatibles avec les résultats acceptés par la communauté académique ou alors pouvant être justifiés par un raisonnement économique cohérent. Durant cette phase d'exploration numérique, nous avons dû calibrer le modèle avec un pas de temps de 10 ans. Plusieurs tentatives de calibration avec un pas de 1 an ont échoué. On constatait alors une absence de convergence du modèle.

Le modèle de la *baseline* nous a servi de test de pertinence du modèle complet. En n'intégrant pas de fonction de dommages, il permet de tracer différentes trajectoires de l'économie (consommation par tête, produit par tête, émissions par tête) dans un scénario "au fil de l'eau". S'assurer que les abattements engendrés par ce modèle demeuraient nuls tout au long de la période considérée, représentait pour nous un gage de cohérence logique du modèle.

Ensuite, pour démêler les mécanismes du modèle, nous avons fait tourner sept modèles en parallèle, chacun différant des autres par les spécifications de la sensibilité climatique, de la fonction de dommages ou encore de la distri-

bution de probabilités, tout en conservant un socle commun. La souplesse de la méthode permet de tester diverses intuitions de recherche, de jouer avec les paramètres et de mener aisément des analyses de sensibilité.

2.2 Les résultats et leur interprétation

Nous n'exposons les résultats que de deux modèles avec une fonction de dommages sigmoïdale, qui représente mieux que la fonction quadratique les effets de seuil et de rupture qui pourraient caractériser les crises climatiques. Ces deux modèles diffèrent seulement par leur traitement de la sensibilité climatique. Dans l'un des modèles la sensibilité évolue de 2.5 K à 8 K, tandis que dans l'autre la sensibilité est fixée à 3.5 K. Pour chacun des modèles on considère la possibilité d'une catastrophe écologique en accordant une probabilité non nulle à l'hypothèse d'une sensibilité climatique de 8 K dans le cas du premier modèle ou en faisant varier à la baisse, dans le second, le seuil de déclenchement du saut de la fonction sigmoïdale. Traditionnellement la fourchette [1.7 K, 2.3 K] est retenue, le scénario catastrophe abaisse cette fourchette à [1.4 K, 2 K].

Ainsi nous lirons les graphiques qui suivent à partir de ces trois questions principales : Quel est l'effet de la sensibilité climatique sur le rythme des abattements, sur la valeur sociale du carbone et sur le taux social d'actualisation ? La possibilité d'une surprise climatique affecte-t-elle les résultats ? Enfin, le taux social d'actualisation intégrant le changement climatique diffère-t-il sensiblement du taux de la "baseline" ?

2.2.1 Les trajectoires d'abattement

Premier cas : avec variation de la sensibilité climatique

Pour comprendre le graphique il faut savoir que le modèle a été calibré de telle façon que la date t_{info} , date à laquelle l'incertitude sur les conséquences du changement climatique est levée, est fixée à 2020. La forme des courbes s'interprète alors aisément. Avant 2020, la société anticipant la valeur présente des dommages futurs possibles induits par ses émissions de carbone préfère par précaution abattre une partie de ses émissions présentes. En 2020, si elle apprend qu'elle a trop abattu par rapport aux dommages espérés alors elle relâche dans un premier temps son effort, puis reprend dès 2030 son entreprise de décarbonisation de l'économie. En 2100, l'abattement est total. Ce scénario correspond à une sensibilité climatique de 3.5 K considérée comme modérée. L'abattement devient pourtant maximal au cours du temps car le planificateur bienveillant ne veut pas exposer l'économie à des

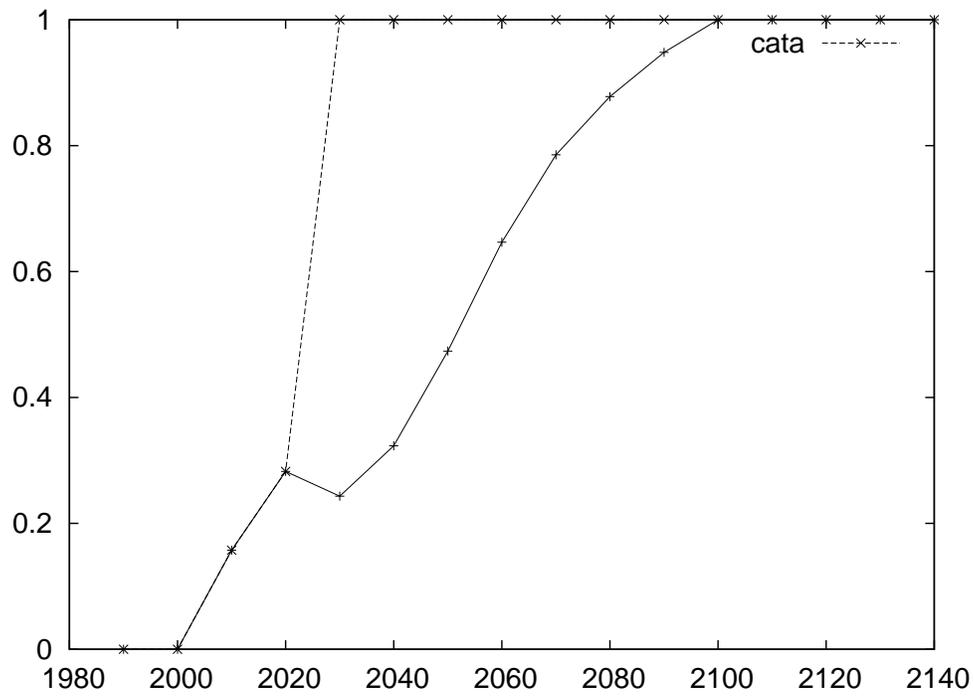


FIG. 2.1 – Trajectoires d’abattement (en fraction) des émissions de carbone sous les hypothèses d’une sensibilité climatique modérée et d’une sensibilité climatique forte

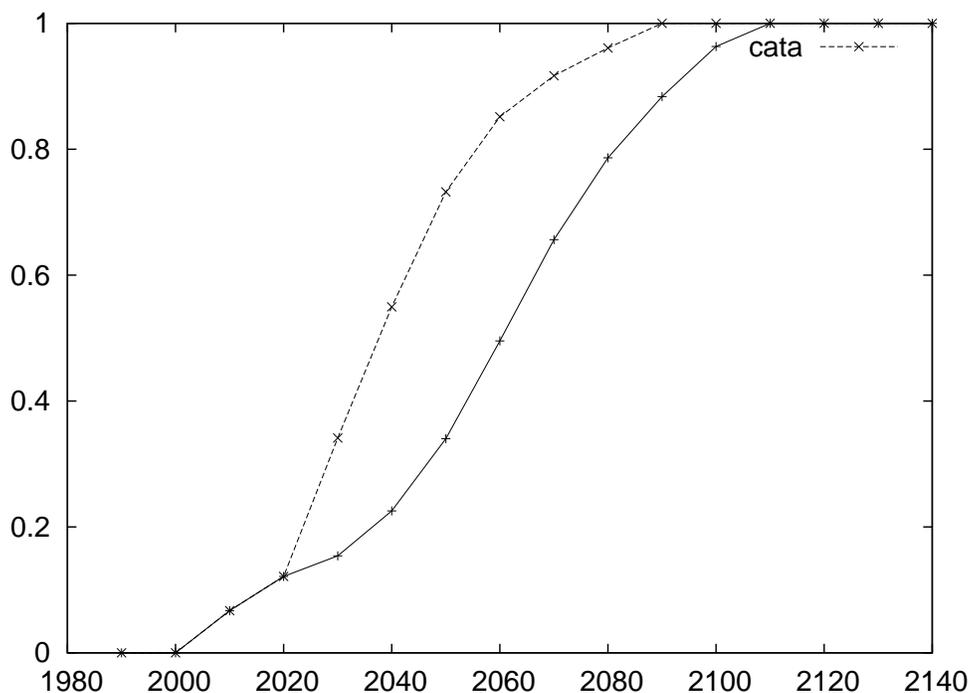


FIG. 2.2 – Trajectoires d’abattement des émissions de carbone (fraction) avec sensibilité climatique fixe

dommages trop grands, en cas de franchissement d’un seuil de température critique (celui qui déclenche le saut de la fonction sigmoïdale). A l’inverse, en cas de ”mauvaise nouvelle” climatique en 2020 (une sensibilité climatique de 8 K par exemple), la société est contrainte d’accélérer son effort et abat la totalité de ses émissions dès 2030.

Deuxième cas : avec sensibilité climatique fixe

Cette figure appelle un commentaire plus nuancé. L’abattement total des émissions de carbone intervient à une date plus éloignée, 2110 en cas de conséquences modérées et même en cas de mauvaise nouvelle (abaissement du seuil de déclenchement du saut de la fonction de dommages), puisque l’abattement n’est total qu’à partir de 2090.

On en déduit que la sensibilité climatique joue un rôle crucial dans la détermination du rythme optimal des abattements. Une analyse de sensibilité menée plus avant permettrait de mesurer précisément le poids de la sensibilité climatique dans la forme des résultats. Les graphiques présentés mettent

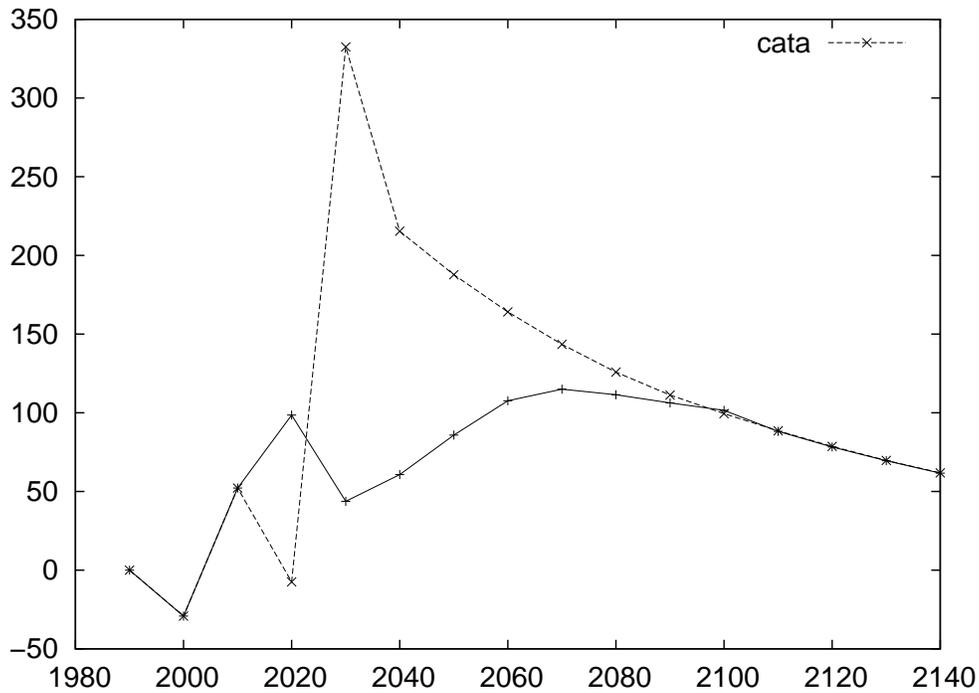


FIG. 2.3 – Profils de la valeur sociale du carbone (en \$/ton) avec sensibilité climatique variable

seulement en évidence le phénomène.

2.2.2 Le profil de la valeur sociale du carbone

La valeur sociale du carbone se dérive directement des abattements puisqu'elle est proportionnée à l'effort fourni par la société. Ainsi les deux graphiques suivant se lisent à l'aune des deux graphiques précédents.

La valeur sociale du carbone avec variation de la sensibilité climatique (2.3)

Sous l'hypothèse d'une sensibilité climatique modérée, la VSC augmente progressivement jusqu'en 2020, date à laquelle elle vaut 100 dollars, avant de fléchir, tout comme les abattements, jusqu'à 50 dollars en 2030 puis de remonter légèrement au dessus de 100 dollars en 2070 quand l'abattement est presque total. La VSC décline ensuite en raison de la baisse progressive des coûts d'abattement liée au progrès technique (supposé croître à un taux

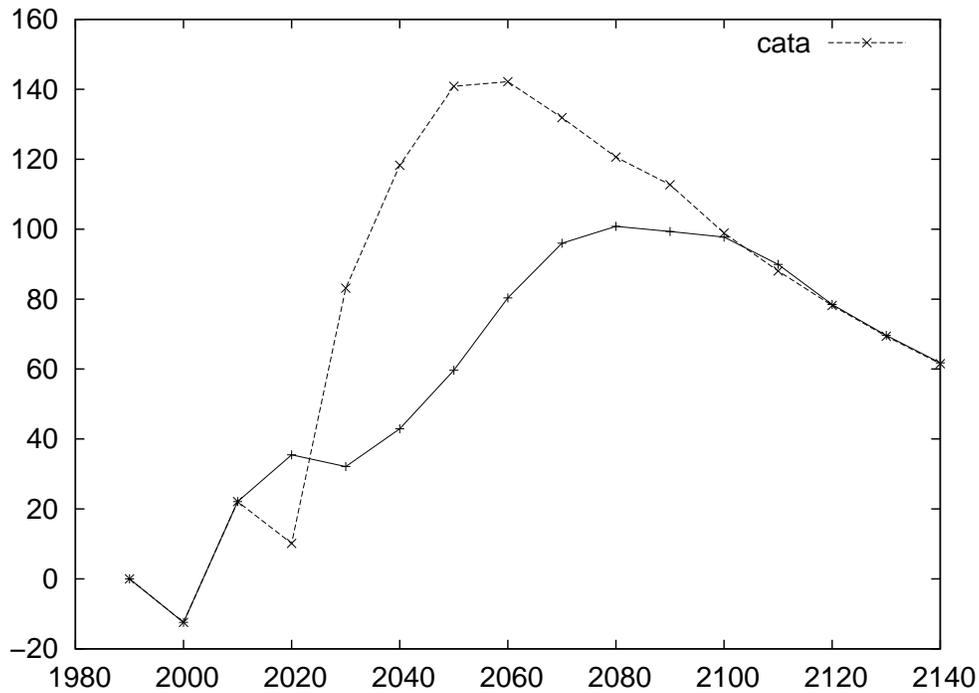


FIG. 2.4 – Profils de la valeur sociale du carbone (en \$/tonne) avec sensibilité climatique fixe

constant) et à la baisse des émissions nouvelles.

Jusqu'en 2020, la VSC en cas de catastrophe possible suit des mouvements plus erratiques. La croissance très forte des abattements après 2020 déclenche l'effet du facteur d'inertie (qui est neutralisé tant que la croissance des abattements est modérée) qui fait baisser la valeur du carbone de la période précédente. La trajectoire qu'elle suit ensuite est beaucoup plus intuitive. Cette dernière effectue un bond de 0 à 330 dollars entre 2020 et 2030, période qui correspond à l'investissement massif nécessaire pour abattre totalement les émissions en 2030. La VSC décline ensuite et rejoint la trajectoire de la VSC avec sensibilité climatique modérée à partir de 2100. Cela s'explique par le fait qu'il est optimal dans les deux cas de stabiliser la concentration en carbone de l'atmosphère au même niveau et que les coûts d'abattement deviennent progressivement égaux.

La valeur sociale du carbone avec sensibilité climatique fixe (2.4)

Le graphique appelle les mêmes commentaires que ceux du précédent pour le scénario avec conséquences modérées. En revanche, la trajectoire de la VSC dans le scénario catastrophe diffère largement de son homologue du cas précédent, la valeur de la VSC ne dépassant pas 140 dollars. On retrouve là encore, l'effet structurel de l'hypothèse sur la sensibilité climatique.

2.2.3 Effet du changement climatique sur le taux d'actualisation

Le taux d'actualisation social (TAS) α calculé par le modèle reprend la formule de Ramsey (1920) présentée dans le premier chapitre selon laquelle $\alpha = \rho + g_c \tau$, avec ρ le taux de préférence pure pour le présent fixé à 0.02%, τ le coefficient d'élasticité de l'utilité marginale vaut 1 puisqu'une fonction d'utilité logarithmique à élasticité intertemporelle constante a été retenue et g_c le taux de croissance de la consommation par tête intègre les coûts d'abattement et les dommages induits par le changement climatique. Rappelons tout de même que cette formule n'est qu'une approximation de la valeur exacte du taux d'actualisation établie dans le premier chapitre $((1 + \rho) \frac{u'(C_{t-1}^s/N_{t-1})}{u'(C_t^s/N_t)} - 1)$. Cette valeur exacte est en fait peu différente la formule de Ramsey "augmentée" du changement climatique. Par commodité nous utilisons cette dernière au sein des simulations.

Tandis qu'à l'état stationnaire, ce taux est constant, en présence de changement climatique, le niveau du TAS est directement affecté par les variations de g_c qui subit les coûts d'abattement et les effets de l'incertitude sur les dommages. Les graphiques suivant présentent la différence entre le TAS intégrant le changement climatique et celui de la baseline.

Pour comprendre les fluctuations observées il faut rappeler que l'effort d'investissement de la société est inversement proportionné à la valeur du TAS. Schématiquement, retenons qu'un TAS élevé déprécie la valeur présente d'un bénéfice futur et incite à la consommation présente. Tandis qu'un TAS bas pousse à l'investissement aujourd'hui pour recueillir des bénéfices futurs.

Commentaires sur le taux d'actualisation social de la baseline

Pour interpréter les mouvements du TAS intégrant le changement climatique et pour éviter toute conclusion hâtive, il est essentiel de visualiser le profil du TAS de la baseline.

La trajectoire suivie par le TAS s'explique essentiellement par l'évolution démographique de la société. Par construction, la variable clé du TAS est le

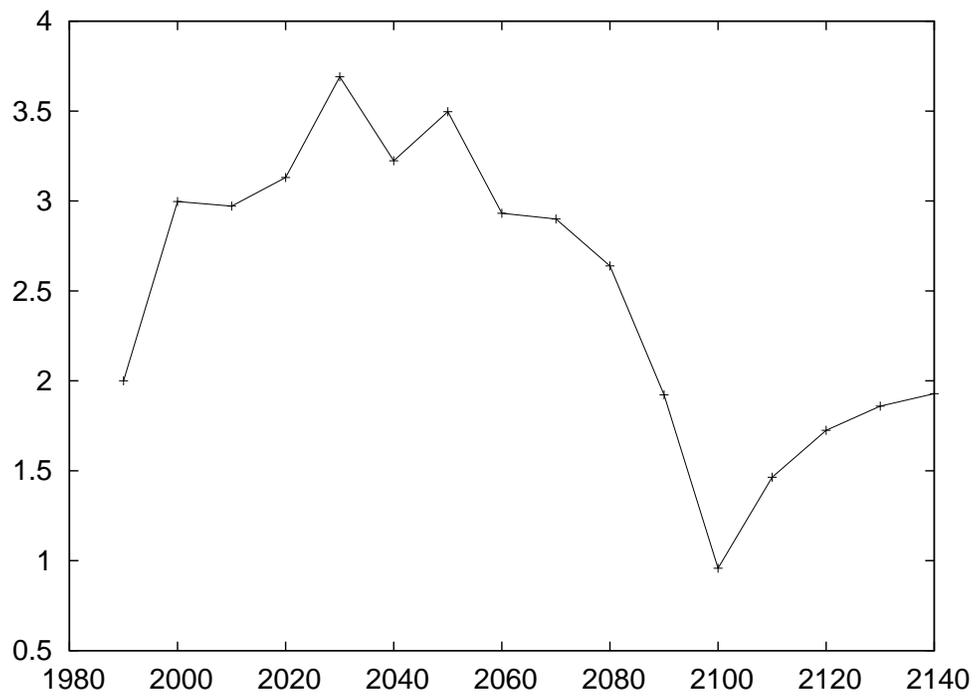


FIG. 2.5 – Evolution du TAS de la baseline

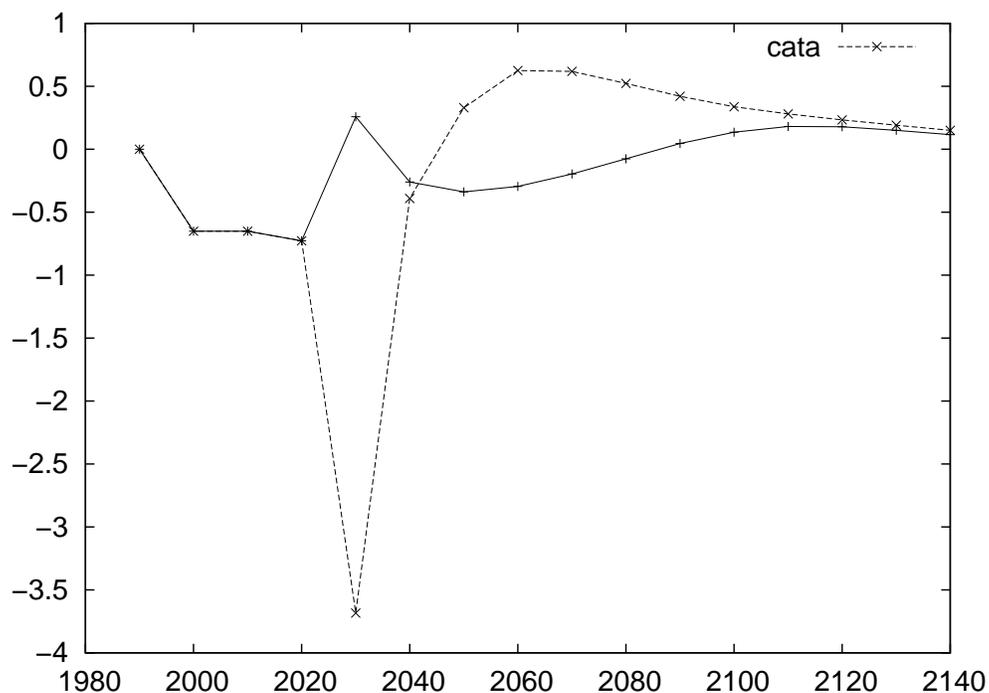


FIG. 2.6 – Différence entre les TAS avec sensibilité climatique variable et le TAS de la baseline

taux de croissance de la consommation par tête g . puisque τ vaut 1 et que ρ est fixé à 2%. Ainsi le TAS augmente jusqu'en 2030, période pendant laquelle la croissance de la consommation totale est plus forte que la croissance démographique puis décroît pour la raison inverse jusqu'en 2100. En fin de période, quand l'état stationnaire est atteint, ces deux taux de croissance s'égalisent, et donc g s'annule et le TAS vaut 2%.

Evolution du taux d'actualisation social avec sensibilité climatique variable

Les résultats s'interprètent là encore à l'aune de l'évolution des abattements. Les TAS accompagnent l'effort d'investissement consenti par l'économie pour réduire les émissions de carbone.

En effet, jusqu'en 2020 les TAS avec sensibilités climatiques modérée et catastrophique sont égaux et sont inférieurs au TAS de la baseline puisque, dans les deux cas le même effort d'abattement est poursuivi. La différence de 0.7 point avec le TAS de la baseline n'est pas négligeable. Elle signifie que

les coûts d'abattement et les dommages du changement climatique affectent véritablement le niveau de g_c .

Après la levée de l'incertitude en 2020, les TAS suivent des trajectoires opposées selon la nature de l'information qui a été reçue. Dans le cas catastrophique le TAS s'abaisse rapidement jusqu'à s'annuler en 2030, date à laquelle l'abattement doit être total. On observe un écart de 3.7 points avec le TAS de la baseline. En revanche, le TAS avec sensibilité climatique modérée remonte dans un premier temps jusqu'à dépasser le TAS de la baseline en 2030. Rappelons que pendant cette période, il est optimal dans ce cas de relâcher l'effort d'abattement. Quand cet effort reprend le TAS repasse sous le niveau de celui de la baseline sans créer toutefois un écart considérable, car avec le temps les coûts d'abattement diminuent (effet du progrès technique) et la part de ces coûts et des dommages rapportée au produit total se réduit notablement. En fin de période elle devient même négligeable dans les deux cas ; c'est pourquoi les TAS rejoignent le niveau du TAS de la baseline.

Le résultat frappant de ce graphique est la différence radicale entre les deux TAS au moment de la révélation de l'incertitude en 2020 puisqu'il s'ensuit deux comportements d'investissement opposés.

Evolution du taux d'actualisation social avec sensibilité climatique fixe

Par rapport au graphique précédent, les TAS avec changement climatique s'éloignent du TAS de la baseline dans des proportions moindres. Sous l'hypothèse de sensibilité climatique modérée l'écart ne dépasse pas 0.3 point tandis que sous l'hypothèse de surprise climatique on observe une rupture plus nette entre 2020 et 2060 puisque l'écart atteint 0.72 point en 2040. Toutefois l'interprétation qui lie l'effort d'investissement et le niveau du TAS demeure valide.

Remarques conclusives

La lecture des deux graphiques précédents a permis de tester l'hypothèse selon laquelle le TAS n'était pas indifférent au changement climatique. Les écarts observés avec le TAS de la baseline confirme la validité de l'hypothèse en faisant ressortir le rôle crucial de la sensibilité climatique. Sans pouvoir trancher le débat sur le niveau pertinent du TAS pour faire face au changement climatique, notre modèle met au jour les tensions provoquées par la possibilité d'une surprise climatique et montre qu'il est alors illégitime de confondre un TAS construit avec g et un TAS construit à partir de g_c , l'écart entre les deux taux n'étant pas négligeable.

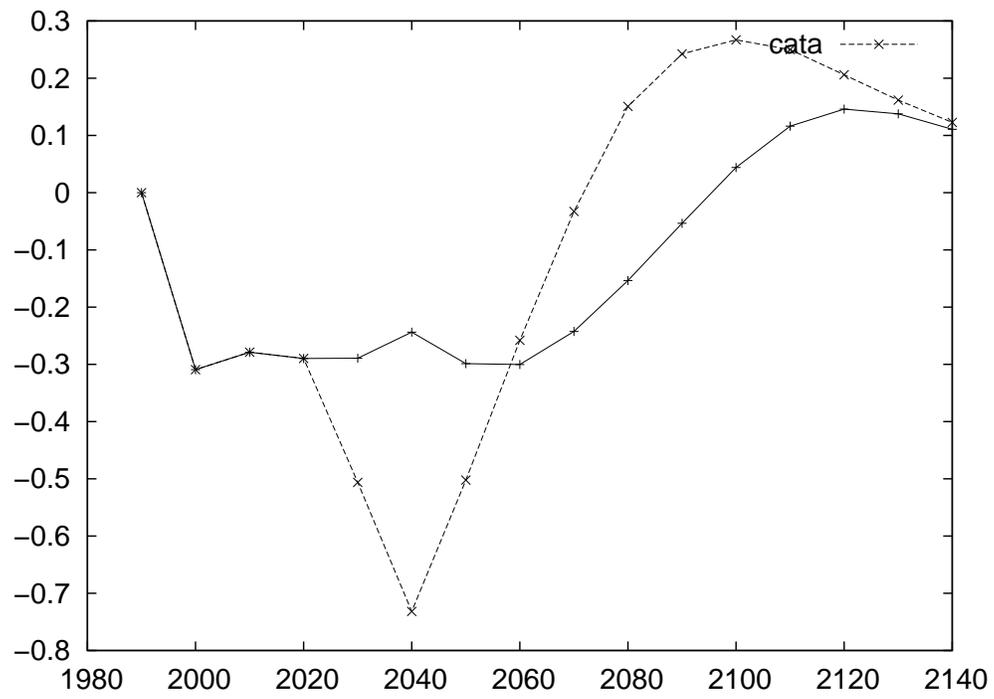


FIG. 2.7 – Différence entre les TAS avec sensibilité climatique fixe et le TAS de la baseline

En soulignant le rôle déterminant de la sensibilité climatique, le modèle localise les lacunes de la connaissance scientifique et indique que réduire l'incertitude qui pèse sur cette variable doit être une priorité pour la recherche. Seule une meilleure connaissance physique des effets du changement climatique permettra à l'économiste de se saisir à nouveau de la question pour guider au mieux les choix des décideurs publics et économiques.

Au sein de la division du travail scientifique, l'économiste renvoie la question aux climatologues, et continue à affûter ses méthodes de décision en contexte d'incertitude.

Chapitre 3

Une controverse scientifique autour de la valeur sociale du carbone comme miroir du rôle de l'économiste dans le débat environnemental

Selon T.S.Kuhn (*Kuhn*, 1962) la mission sociale de la science consiste à résoudre les problèmes théoriques qui se posent à une certaine époque au sein d'une communauté scientifique donnée. Ainsi la dynamique de la recherche se nourrit d'énigmes. Aujourd'hui une des énigmes qui animent la recherche est la question du changement climatique. Les sciences du climat semblent s'accorder pour dénoncer les gaz à effet de serre comme les agents responsables du phénomène, et pour en pointer l'origine anthropique, à travers les émissions de CO₂. Une fois la cible définie, l'économiste intervient dans le programme de recherche pour transformer cette entité physique en entité économique et pour l'intégrer dans le calcul économique qui jusqu'alors l'ignorait. Ce chapitre a trois objectifs principaux : situer nos résultats au sein d'un champ théorique qui n'est pas unifié, en témoigne la virulente controverse qui a suivi la publication du rapport Stern ; effectuer un détour réflexif sur le sens de nos résultats et de notre démarche scientifique ; et enfin, proposer une réflexion sur le rôle et la "bonne" place de l'économiste dans le débat environnemental.

3.1 Clarification du débat académique à partir de la controverse suscitée par le rapport Stern

Les recommandations faites par N.Stern à l'issue de son étude (*Stern, 2006*) sont en décalage avec les recommandations qui ont historiquement été suivies par les décideurs. En effet, à contre-courant de l'idée, apparemment raisonnable et communément acceptée, d'une action progressive de réduction des émissions, N.Stern défend l'idée audacieuse d'une réduction massive et immédiate de ces émissions. La communauté académique se demande pourquoi aucune explication de ces écarts avec la vulgate économique dominante n'est fournie explicitement au sein du rapport, alors qu'à l'évidence, son auteur, qui est un économiste de renom, sait pertinemment que ses résultats diffèrent largement de ceux établis par la science "normale". N.Stern aurait-il fait une découverte majeure qui serait à l'origine de cette surprise théorique ? ou bien aurait-il failli aux règles de l'art de l'économie du changement climatique, patiemment élaborées au cours des trois dernières décennies ? Ces détracteurs saluent l'imposant travail mais dénoncent sans ménagement les confusions élémentaires qui émaillent l'analyse en identifiant deux types de faiblesses : une erreur de raisonnement qui mine l'ACB esquissée et des hypothèses de calcul atypiques portant sur la forme et le niveau du taux d'actualisation ainsi que sur l'intégration de l'incertitude dans les calculs. Ces défenseurs reconnaissent la force de frappe politique et symbolique du rapport qui a véritablement lancé un pavé dans la marre. Leurs arguments sont pour la plupart moins techniques et traduisent bien l'ambiguïté fondamentale du rôle et de la place de l'économiste dans ce débat.

Une telle controverse médiatico-scientifique fournit l'occasion de se demander d'où proviennent les divergences entre les experts. Comment rendre compte des écarts entre des résultats qui revendiquent tous leur solidité scientifique et leur légitimité à participer au débat public ? Différentes mises en forme économique de la question de la valeur sociale du carbone ont été explorées, produisant un large éventail d'estimations qui est souvent interprété, à tort, comme le signe de l'impossibilité théorique de produire une mesure raisonnable de la valeur de la tonne de carbone (*Elkins, 2005*). La fourchette de -11 dollars à plus de 1000 dollars la tonne de carbone ne représente pas en soi une faiblesse ou un aveu d'impuissance du calcul économique puisqu'elle révèle peut-être l'existence d'une "vraie" incertitude qu'une valeur unique se saurait mettre au jour. Elle exige toutefois quelques précautions d'usage, trop souvent négligées par le commentateur pressé. Avant de conclure à l'impossibilité de mesurer la valeur sociale du carbone, il convient de comprendre la

nature des valeurs produites en se référant aux modèles théoriques dont elles sont issues.

Les différences observées entre les valeurs sociale du carbone ont essentiellement deux origines : un désaccord sur le scénario pertinent du calcul et au sein du même scénario, la fixation d'hypothèses distinctes sur le taux d'actualisation et sur l'intégration de l'incertitude dans le modèle.

3.1.1 Le sens des différents scénarii de calcul

Trois scénarii de calcul principaux se distinguent au sein de la littérature : le scénario "au fil de l'eau" ("business as usual") dans lequel aucune mesure de prévention du changement climatique n'est instaurée ; le scénario de l'ACB pilotée par un planificateur bienveillant dont l'objectif est de faire suivre à l'économie une trajectoire optimale, en balançant coûts d'abattement des émissions et coûts évités du changement climatique ; et enfin le scénario de l'ACE dans lequel le planificateur bienveillant doit placer l'économie sur la trajectoire qui minimise les coûts pour respecter un plafond de concentration en CO₂, fixé de façon exogène par un processus scientifico-politique. Chaque scénario possède sa propre cohérence et produit des résultats irréductibles. Des valeurs issues de scénarii différents sont par suite incommensurables.

Plusieurs auteurs (*Maddison, 2007*) (*Tol et Yohe, 2007*) ont fait remarquer que le rapport Stern reposait sur une ACB tronquée, voire sur une erreur de raisonnement. En effet, le rapport confond en permanence ACB, ACE et analyse le long d'un scénario "au fil de l'eau". Tandis qu'il prétend réaliser une ACB, il fonde l'évaluation des coûts d'abattement sur l'hypothèse qu'un plafond de 550ppm ne doit pas être dépassé pour éviter de s'exposer à des phénomènes catastrophiques. Une telle démarche ressemble ainsi davantage à une ACE. D'autre part, les dommages induits par le changement climatique et donc la valeur sociale de la tonne du carbone sont mesurés à partir d'un scénario "au fil de l'eau". Dans un tel scénario la valeur du carbone croît de façon continue dans le temps avec la croissance des émissions qui n'est entravée par aucune politique de lutte contre le changement climatique. Dès lors la valeur produite a de fortes chances de se trouver dans une tranche élevée de la fourchette d'évaluation, car un scénario qui exclut toute mitigation du climat, dramatise la situation et exacerbe les menaces potentielles qui pèsent sur l'économie. Ainsi, alors que le prix médian de la tonne du carbone qui ressort d'une revue de la littérature est de 14 dollars, N.Stern établit un prix de 314 dollars. Une des origines d'un tel écart réside dans le scénario "au fil de l'eau" retenu pour le calcul. Dans un tel scénario, rien est fait pour prévenir les conséquences potentiellement dramatique du changement climatique, c'est pourquoi la VSC peut atteindre des niveaux très

élevés. Mais remarquons que, *ceteris paribus*, ce scénario produit des valeurs supérieures à celles produites dans un scénario d'ACB puisque, sans aucune contrainte sur sa croissance, l'économie peut s'approcher de seuils dangereux et s'exposer à des dommages plus forts que ceux qui apparaissent le long d'une trajectoire optimale d'abattement.

En résumé, la prétendue ACB du rapport compare les coûts d'abattement totaux qui permettent de ne pas dépasser le seuil de 550ppm (évalués à environ 1% du PIB) et les dommages totaux du changement climatique, allant de 5% à 20% du PIB en intégrant des dommages non marchands, si rien n'est fait pour les empêcher. La comparaison de ces deux ordres de grandeur conclut aisément à la légitimité d'une action immédiate et vigoureuse de réduction des émissions des gaz à effet de serre. Mais une telle comparaison est-elle licite ?

Rappelons d'abord que le scénario "au fil de l'eau" produit des valeurs critiquées pour leur manque de réalisme. En effet s'il est établi dans un tel scénario que la tonne de carbone vaut 1000 dollars en 2100 par exemple, alors il est en fait hautement improbable que la "vraie" valeur du carbone en 2100 soit de 1000 dollars, en raison de l'existence de techniques d'abattement des émissions de CO₂ bien moins coûteuses. Typiquement, si une technologie butoir ("backstop technology" qui permet de supprimer complètement les émissions de carbone) est disponible sur le marché à un prix de 250 dollars la tonne abattue, les agents économiques, s'ils connaissent l'existence de cette technologie, auront toujours intérêt à abattre plutôt que de continuer à émettre en prenant le risque de s'exposer à des dommages très coûteux dans le futur. Ainsi, pour intégrer la possibilité d'abattre, il faut substituer à ce scénario "au fil de l'eau" un scénario dans lequel un planificateur bienveillant se livre à une ACB pour dégager la valeur sociale du carbone le long d'une trajectoire optimale. A l'optimum, et à chaque date, la valeur présente du bénéfice tiré d'une tonne de carbone évitée est égal au coût d'abattement d'une tonne de carbone. Dans notre exemple, cela signifie que la valeur du carbone ne peut en aucun cas dépasser le prix de la "backstop". Ainsi, il serait absurde de transmettre aux agents économiques un signal prix de 1000 dollars, puisque le long d'une trajectoire optimale de l'économie, une telle valeur n'a aucune chance d'apparaître. Toutefois, cette analyse pêche peut-être par optimisme et prête aux décideurs publics, personnifiés par la fable du planificateur bienveillant, des capacités de calculs trop puissantes et des intentions environmentalistes qui ne correspondent pas à leurs décisions réelles. ¹

¹Des études sociologiques d'observation de la prise de décision et du comportement concret des décideurs en matière d'environnement seraient nécessaires pour juger de l'intérêt heuristique du scénario avec mitigation et planificateur mais nous bornons notre

Mais ce n'est pas parce que les valeurs présentes dans le rapport Stern sont irréalistes qu'elles sont fausses. Elles tirent leur cohérence d'un scénario qui fonctionne comme un révélateur des risques de l'inaction. C'est pourquoi de telles valeurs à "sensation" font frémir l'opinion et frappent les esprits, de sorte qu'elles peuvent servir d'arguments pour entraîner l'adhésion des diverses parties prenantes du débat environnemental à un projet volontariste de lutte contre le changement climatique. En revanche ces valeurs sont irréductibles au scénario de calcul qui fonde leur mesure et ne sauraient être comparées, en toute rigueur, avec le second plateau de la balance : les coûts d'abattement totaux liés au respect du plafond de 550ppm.

La mesure de ces coûts suit donc clairement une méthode d'ACE, l'objectif du planificateur consistant alors à minimiser les coûts, essentiellement techniques, induits par la contrainte du plafond de concentration. Peu importe dans ce cas si la contrainte, fixée lors d'un processus de négociations politiques entre des intérêts divergents, possède une pertinence écologique attestée, puisqu'une fois adoptée par tous, elle devient, par convention, la limite acceptable du changement climatique. A proprement parler, elle trace la ligne au-delà de laquelle des dommages environnementaux apparaissent aux yeux de la communauté internationale. Ceux qui sont nécessairement produits en deçà de cette ligne ont certes une existence réelle, mais ne comptent pas politiquement puisque la fixation d'un plafond de concentration représente, de fait, une autorisation d'émettre du CO₂ et donc de contribuer au changement climatique. A ce titre, le plafond de 550ppm n'est pas très sévère et induit des coûts d'abattement moins élevés qu'un plafond de 450ppm qui pourrait être, cependant, le plafond écologiquement souhaitable. C'est pourquoi ces coûts sont toujours relatifs au plafond d'émission fixé et ne peuvent être comparés avec une évaluation des dommages liés au changement climatique puisque de tels dommages ne peuvent, par définition, apparaître dans un tel scénario de calcul.

Cet ensemble de précisions permet de conclure que, prises isolément, les valeurs des coûts d'abattement et des dommages établies par le rapport Stern possèdent une cohérence interne et un sens économique. Elles peuvent chacune de leur côté plaider pour une action volontariste de réduction des émissions de gaz à effet de serre puisqu'il s'avère qu'une telle action est peu coûteuse alors que les coûts potentiels de l'inaction sont énormes. En revanche, les comparer ne constitue pas une ACB rigoureuse. Les deux valeurs, fondées sur des scénarii de calcul incompatibles, sont de nature différente et se trouvent tout à fait incommensurables. La force de frappe du principal

propos au recensement des scénarii théoriques qui fondent les évaluations monétaires de la tonne de carbone.

argument du rapport Stern s'en trouve considérablement réduite.

3.1.2 Les effets du taux d'actualisation et de l'incertitude

Nous bornons notre analyse à deux autres aspects de la controverse suscitée par le rapport Stern, qui concernent le taux d'actualisation retenue et la façon d'intégrer l'incertitude dans les calculs. D'autres éléments du rapport ont pu être critiqués mais notre sélection fait écho aux points sur lesquels notre propre étude s'est focalisée.

Le choix d'un taux d'actualisation bas

Là encore les partis pris de N.Stern vont à contre-courant de la *doxa* économique. S'il distingue bien au sein du taux social d'actualisation les composantes qui interviennent dans la formule de Ramsey, $\rho + \tau.g$, avec ρ le taux de préférence pure pour le présent, g le taux de croissance de la consommation par tête et τ l'élasticité intertemporelle de l'utilité marginale de la consommation ; il fixe, en revanche, ces composantes à des niveaux atypiques. Faisant la synthèse entre l'argument originel de Ramsey (*Ramsey*, 1928) selon lequel il serait immoral de tolérer un taux de préférence pure pour le présent positif puisque cela reviendrait à ne pas considérer les générations futures sur un plan d'égalité avec les générations présentes, et l'argument plus technique de Koopman (*Koopmans*, 1960) qui, pour des raisons mathématiques de convergence, contraint ce taux à être strictement positif, N.Stern fixe ρ à 0.1 alors que les économistes s'accordent pour le définir autour de 2%. Il pose ensuite $\tau = 1$ et $g_c = 1.3$, de sorte que le taux social d'actualisation est finalement égal à 1.4% alors qu'il est traditionnellement établi dans une fourchette de 3 à 6%.

L'objectif de N.Stern est clairement de justifier un taux d'actualisation le plus bas possible afin de pouvoir faire peser des dommages lointains dans la balance de son ACB alors que les taux d'actualisation communément retenus au sein des projets d'investissement ont pour effet d'"écraser" le futur. Par exemple, si un dommage D provoque une perte d'une unité de consommation en 2100, la valeur présente de cette unité de consommation perdue est de 0.39 avec un taux d'actualisation social de 1.4% tandis qu'elle n'est plus que de 0.06 et même de 0.003, c'est-à-dire quasi nulle, avec des taux valant respectivement 3% et 6%. En refusant de sacrifier les générations futures au profit de la voracité des générations présentes et afin de prendre en considération des effets du changement climatique qui dépassent les horizons temporels habituels du calcul économique, le rapport Stern défie les valeurs tutélaires du

débat environnemental.

Mais un tel coup de force se heurte nécessairement aux critiques des gardiens de la doctrine qui dénoncent les incohérences du raisonnement de N.Stern. Les critiques visent exclusivement le niveau des deux paramètres de préférence ρ et τ .

Pour D.Maddison, invoquer des arguments moraux d'égalité de traitement des générations pour fonder le choix de $\rho = 0.1$ n'est pas suffisant car si on considère que les générations futures seront plus riches que les générations présentes comme le taux de croissance de la consommation fixé à 1.3% le suggère, alors il n'est pas forcément équitable de faire peser sur les générations présentes le coût de la réduction des émissions.

Les commentaires de P.Dasgupta (*Dasgupta, 2007*) visent la valeur de τ qui selon lui est sous-estimée dans le rapport. Accorder une valeur unitaire à τ revient selon lui à traiter de façon inégalitaire les membres de la génération présente, et manque totalement les effets distributifs du changement climatique. Il appuie son raisonnement sur des travaux de C.Gollier qui tolèrent un taux de préférence pure pour le présent très bas mais encadrent τ dans l'intervalle $[2, 4]$. Il y aurait ainsi une certaine incohérence à prôner un égalitarisme stricte entre les générations et à ne pas prendre en considération les inégalités intragénérationnelles.

C'est pourquoi W.D.Nordhaus (*Nordhaus, 2007*) souligne quant à lui que le taux de préférence pure pour le présent et le degré d'aversion à l'inégalité ne sauraient être complètement indépendants dès lors que le TAS est interprété sous un angle éthique. Le choix d'un ρ bas conduit à choisir un τ élevé et vice versa, sous peine de s'empêtrer dans des choix éthiques injustifiables. De sorte que le pari de Stern d'allier équité intergénérationnelle et équité intragénérationnelle tout en s'attendant à maintenir un taux d'actualisation le plus bas possible semble difficilement tenable.

Enfin, à ces critiques sur les paramètres éthiques du taux social d'actualisation s'ajoute une critique empirique. M.L.Weitzman (*Weitzman, 2007b*) fait ainsi remarquer que le comportement d'épargne observé des ménages (environ 15% du revenu en Grande Bretagne) est incompatible avec un taux d'actualisation valant 1.4%. En effet, un rapide calcul montre que pour soutenir un tel taux, les ménages devraient épargner 31% de leur revenu ce qui représenterait un bouleversement économique majeur.

Que l'argument de l'incohérence avec les données empiriques, brandit par un des "papes" de l'économie mainstream, condamne la pertinence d'une théorie économique a de quoi abasourdir l'apprenti économiste. Mais N.Stern ne se démonte pas si facilement et répond, non sans humour, dans un document de travail que le comportement d'épargne réel des agents n'a aucune raison d'être optimal tandis que sa démarche est clairement normative. Elle

ne cherche pas à dériver de l'observation des comportements des agents sur le marché des préceptes moraux, car le marché ne saurait constituer la norme ultime des choix éthiques. En d'autres termes, ce n'est pas le marché qui dicte sa morale mais le théoricien qui, par des expériences de pensée, établit l'axiomatique de l'éthique contenue dans le modèle économique. Ainsi, il juge non convaincantes les critiques portant sur la prétendue incohérence de ses valeurs avec les données empiriques.

En revanche, il a conscience des limites du choix d'un τ unitaire. Il remarque que les experts ne parviennent pas à s'accorder sur une valeur plus raisonnable qu'une autre et qu'il est probable que ce paramètre dépende en fait du revenu d'un pays et qu'il varie dans le temps. Mais il refuse de souscrire à une valeur trop haute de τ (supérieure à 1.5) bien qu'elle puisse être justifiée moralement, en raison de l'absence d'un tel scrupule égalitariste dans tout autre politique publique. Il ne serait pas loyal d'évaluer les effets redistributifs de la prévention du changement climatique à l'aune de critères différents de ceux utilisés pour évaluer les effets induits par les politiques de lutte contre la pauvreté par exemple.

Les effets de l'incertitude

La question de l'incertitude charrie des concepts très abstraits dont la manipulation est complexe. En dépit du sillon structurant pour la discipline économique, tracé par la théorie de l'espérance d'utilité forgée dès les années 1940 par J.Von Neuman et O.Morgenstern (*von Neumann et Morgenstern*, 1944), la prise en considération de l'incertitude dans le calcul économique n'est pas stabilisée. L'incertitude porte sur les dommages futurs liés au changement climatique, sur la possibilité d'apparition d'événements climatiques extrêmes, sur la sensibilité climatique et sur les progrès de la science. Même si la science économique n'est pas démunie pour traiter de ce genre de problèmes qui sont le lot des assureurs et des financiers, il semble que la question du changement climatique recèle des spécificités propres qui brouillent les résultats classiques de la théorie. Face à une situation d'incertitude radicale, la théorie doit composer avec des probabilités subjectives et renoncer aux modèles déterministes qui ne savent traiter que du risque. Mais dès lors, les résultats ne sont-ils pas complètement déterminés par cette incertitude structurelle qui pèse sur les paramètres clés des modèles intégrés ? Nul consensus sur la place et l'interprétation de l'incertitude au sein des modèles ne semble émerger.

D.Maddison conteste le poids qui est donné aux catastrophes futures possibles. Accorder une probabilité, si faible soit-elle, à un événement futur catastrophique pour l'économie mondiale et maintenir un taux d'actualisation

bas, ne peut que gonfler artificiellement la valeur présente des dommages futurs et biaiser ainsi l'ACB en faveur d'une action immédiate. Ainsi le rapport Stern intègre dans la valeur présente des dommages une catastrophe qui provoquerait la disparition de l'humanité, associée à une probabilité, certes faible, mais qui pèse dans le calcul final. C'est pourquoi, il plaide, de concert avec M.L.Weitzman, pour ne pas considérer le problème comme celui d'une ACB qui doit révéler la trajectoire optimale de la consommation mais plutôt comme un problème d'assurance posé à la société : quelle prime maximale est-elle disposée à payer pour éviter les risques du changement climatique que l'épargne normale ne suffit pas à compenser ? Maddison conclut son raisonnement en disant qu'il est peut-être moins coûteux de compenser des victimes plutôt que d'abattre aujourd'hui nos émissions sous prétexte que des dommages futures hautement aléatoires seront ainsi évités.

A un niveau d'abstraction encore supérieur, M.L.Weitzman veut montrer que les effets de l'incertitude structurelle l'emportent sur ceux du taux d'actualisation. De sorte qu'il ne suffit pas de définir une distribution de probabilité sur la forme des dommages pour pouvoir traiter le problème comme une décision en présence de risques. Il se peut même que la forme de cette distribution de probabilité et notamment la présence ou non d'une queue lourde détermine en grande partie les résultats et donc les préconisations de politiques environnementales. Mais dans une situation d'incertitude radicale une telle distribution ne révèle que des croyances sur les états du monde possibles. En considérant le taux de croissance de la consommation par tête g qui intervient dans la formule du taux social d'actualisation, comme une variable aléatoire, il est possible de faire apparaître, après quelques transformations calculatoires, que l'utilité marginale d'une unité supplémentaire de consommation dans le futur peut devenir infinie, ce qui par suite rend le calcul du taux d'actualisation impossible. Il en déduit que les effets de l'incertitude priment sur ceux du taux d'actualisation ce qui relativise le débat sur le bon niveau de ce taux et trace les grandes lignes du programme de recherche à suivre : les efforts devraient ainsi être concentrés sur la réduction de l'incertitude par la production de connaissances plus précises.

J.C.Hourcade propose d'explorer une autre interprétation de l'usage des probabilités subjectives dans les modèles intégrés (*Hourcade, 1996*). Les croyances sur les différents états du monde possibles sont autant de positions politiques prises dans le débat qui se matérialisent par des choix d'abatement du carbone différents. L'incertitude n'est pas objective en tant qu'elle serait intrinsèque aux phénomènes climatiques mais clairement subjective car ancrée dans les convictions politiques des décideurs. Toutefois, le rôle de la science est de produire des connaissances qui un jour, à une date t_{info} , lèveront l'incertitude et révéleront le vrai état de la nature. Il sera alors temps d'ajuster

la trajectoire de l'économie à la réalité environnementale. Intégrer le fait que l'incertitude sera levée à une date inconnue ne condamne pas à l'attentisme et peut plaider pour une action de réduction des émissions séquentielle. En cas de bonne nouvelle à la date de levée de l'incertitude il sera toujours temps de relâcher les efforts et en cas de mauvaise nouvelle, l'effort de réduction des émissions sera moins coûteux que si rien n'avait été fait auparavant. Cette interprétation pragmatique confère à l'économiste une place réaliste dans le débat public que nous décrivons un peu plus loin.

Cette rapide revue des controverses académiques autour de l'évaluation de la valeur du carbone montre que la prudence doit être de mise pour comparer les diverses évaluations de la tonne de carbone disponibles dans le débat public car ces dernières ne mesurent pas les mêmes choses en réalité. Il est regrettable que le débat ne soit pas éclairé par des précisions aussi simples, qui réduisent considérablement la fourchette d'évaluation en classant les valeurs obtenues selon leur mode de production et donc selon la réalité qu'elles traduisent. Sans cette clarification préalable, le dialogue de sourds entre les parties prenantes du débat environnemental a toutes les chances de perdurer.

3.2 Auto-analyse de notre démarche scientifique

Lors de cette ultime phase du mémoire, nous souhaiterions nous livrer à un exercice d'auto-analyse. Ce détour réflexif doit permettre de mieux cerner la nature de la démarche scientifique suivie dans cette étude. Il s'agit donc de répondre à la question lancinante et existentielle que se pose le chercheur consciencieux à la fin de son travail : "en quoi ai-je fait oeuvre de science ?" Cette question générale se décline en deux interrogations portant l'une sur le sens des résultats et l'autre sur la pertinence de la méthode utilisée pour répondre scientifiquement à la question de la valeur sociale du carbone.

3.2.1 La signification des résultats

Les résultats que nous avons obtenus à l'issue de notre étude proviennent d'un modèle d'ACB avec planificateur bienveillant. Toutes les valeurs obtenues sont donc comparables entre elles et les écarts qu'elles laissent apparaître traduisent les effets de telle ou telle spécification du modèle, c'est-à-dire de telle ou telle hypothèse. Rendre compte de pareilles conventions a le mérite d'explicitier les partis pris et d'empêcher toute naturalisation du chiffre produit. Une fois ces précautions prises et à partir de la grille d'analyse de trois

positions épistémologiques idéal-typiques, nous proposons de démêler le sens de nos résultats afin de saisir ce qu'ils peuvent dire sur le monde.

La position réaliste

La valeur produite par le modèle numérique est une valeur approchée de la vraie valeur, métaphysique, de la tonne de carbone. Cette proposition présuppose qu'une telle valeur existe, ou plutôt préexiste à l'activité de recherche qui l'a mise au jour. La science est ainsi considérée comme une tentative de dévoilement des entités qui composent le monde. Si atteindre l'être du monde demeure l'horizon utopique de la science, le chemin vers la vérité est tortueux. Le progrès scientifique consiste précisément à s'approcher toujours plus près du réel, en affinant les hypothèses, en affûtant les appareils de mesure, en inventant des concepts théoriques plus justes. A l'aune de cette position, nos résultats apparaissent comme des approximations intéressantes, mais en aucun cas définitives, de la valeur de la tonne de carbone. L'éclatement de nos résultats prouve à lui seul l'incomplétude de l'étude, guetée en outre, par l'écueil du relativisme si aucune hiérarchie n'est établie finalement entre les différentes valeurs produites. La vérité et une et ne saurait tolérer l'existence de plusieurs porte-parole, si zélés qu'ils soient.

Pour resserrer les fourchettes d'évaluation il convient de procéder méthodiquement. D'abord repérer l'origine de l'approximation puis combler par un effort de recherche accru, les défaillances de connaissance qui ont rendu impérieux le recours à l'approximation, et donc à l'arbitraire qui éloigne fatalement de la réalité. Remarquons toutefois que la persistance de certaines valeurs approchées est un mal nécessaire pour la science, c'est pourquoi nous évoquons un "horizon utopique". Même cette position réaliste, qui pourrait être qualifiée de "positivisme mou" n'a pas la prétention d'être capable d'achever pleinement sa mission historique, mais poursuit celle de traquer résolument l'arbitraire afin de "coller" toujours davantage au réel. Une telle ambition devrait ainsi rester le véritable moteur de la recherche.

Dans notre cas, d'où proviennent les approximations ? Le passage du calcul analytique au calcul numérique fait évidemment perdre en généralité puisqu'il faut calibrer tous les paramètres du modèle, en se fondant sur des "données" empiriques ou sur des scénarii conjecturaux d'évolution de ces données. Sans revenir sur notre commentaire concernant le caractère "obtenu" des "données" il est à relever que les taux de croissance de la population et du progrès technique ont été fixés de façon exogène, que la forme de la fonction de production retenue est une représentation grossière, néanmoins commode, de la production agrégée, et plus grave encore, nous n'avons pas su trancher entre les différentes fonctions de dommage envisagées, avouant ainsi

l'étendue de notre ignorance des conséquences du changement climatique. Si les premières approximations sont souvent tolérées, voire encouragées par la doctrine économique, il conviendrait de remédier au déficit de connaissance concernant l'évaluation des dommages afin de stabiliser au sein du modèle une fonction de dommage convaincante et de resserrer ainsi la fourchette des valeurs du carbone. Force est de reconnaître qu'à l'issue de l'étude il est difficile, voire impossible, d'affirmer en toute rigueur, laquelle des VSC (330 dollars ou 90 dollars en 2030 dans le cas d'une surprise climatique) obtenues est la plus pertinente.

La position nominaliste

Cette position prend l'exact contre-pied de la position précédente. Si mou qu'il soit, tout positivisme est une illusion. Les candides défenseurs de la position réaliste se leurreraient sur les prétentions cognitives de la science qui ne saurait être à la hauteur de leurs ambitions, quasi mystiques, de révélation de la vérité. L'être des choses est inaccessible à la science, tout comme la valeur métaphysique de la tonne de carbone. D'ailleurs la valeur sociale du carbone n'est qu'un mot ! Cette affirmation provocatrice, dans sa version maximaliste, insiste sur le caractère conventionnel de la production des résultats scientifiques. La science produit un discours cohérent sur le monde mais n'est pas capable de reproduire le monde. Ainsi, les chiffres ne sont que des chimères théoriques et n'ont pas de consistance empirique. Ils ne composent pas le monde comme des entités réelles et n'ont de sens que dans le cadre très étroit des hypothèses et des conventions de calcul définies par le chercheur. C'est pourquoi les valeurs que nous avons obtenues n'auraient qu'un sens relatif et clairement circonscrit à notre modèle. Leur prêter un intérêt autre que leur cohérence formelle serait vain.

Le principal mérite de cette approche réside dans sa charge subversive ou plus simplement dans sa capacité à démystifier le travail scientifique en empêchant toute naturalisation de ses résultats. Elle rappelle ainsi que la science est une construction intellectuelle moderne qui a acquis un statut particulier et privilégié parmi les discours qui prétendent fournir des explications sur le monde. En revanche, affirmer que le sens des résultats scientifiques est purement conventionnel et que la valeur sociale du carbone est toujours relative au dispositif de mesure qui l'a engendrée ne permet pas de penser un quelconque progrès scientifique. Seules des rectifications logiques peuvent être apportées à la démarche scientifique, mais à cohérence formelle égale, comment comparer la pertinence relative de deux valeurs du carbone distinctes ? Le désir de progrès et de vérité, au moins provisoire et partielle, n'est-il pas légitime, voire nécessaire pour le bon fonctionnement de la re-

cherche ? Il s'agit de comprendre pourquoi certains résultats sont plus justes et plus convaincants que d'autres.

La position de l'anthropologie des sciences

Le projet de l'anthropologie des sciences, initié par les travaux de Bruno Latour (*Latour et Wooglar*, 1979), vise à corriger les erreurs de l'épistémologie moderne, désignée par cet auteur comme une "police épistémologique" (*Latour*, 1999b), qui se présente souvent comme un discours sur ce que devrait être la bonne science sans se soucier de la pratique concrète de la recherche. L'anthropologie des sciences n'a pas l'ambition de débusquer les erreurs logiques des propositions scientifiques mais de décrire la "science en action" pour en tirer des leçons épistémologiques qui s'appuient sur l'activité observée des chercheurs. Ainsi, nul besoin de penser la possibilité d'une science répondant parfaitement aux critères abstraits de la logique et de la rationalité, il suffit de supposer que les scientifiques réels font de la science et que c'est précisément à partir de leurs pratiques scientifiques qu'il est possible d'analyser la nature de la connaissance.

L'épistémologie moderne a introduit des dichotomies qui structurent notre perception du monde et du savoir : les couples vérité/erreur, réalité/fiction, rationalité/passion, fait scientifique/construction sociale. De telles dichotomies seraient en fait peu éclairantes pour saisir ce qui se joue à travers le discours scientifique. Au lieu de s'obstiner à vouloir faire coller artificiellement les faits scientifiques avec la réalité, il convient de décrire la relation qu'entretiennent le discours scientifique et la réalité. En tant que production humaine, la science relève de l'artifice, du savoir-faire et donc de la construction mais cela la rend-elle pour autant complètement arbitraire ? Cela la prive-t-elle de tout lien avec le réel ? Il s'agit de comprendre que "construction" et "réalité" ne s'opposent pas. Bruno Latour va plus loin en affirmant que c'est parce que le discours scientifique est construit qu'il est réel. Il faudrait alors juger le savoir produit à l'aune de sa solidité. Il est souvent question de la robustesse d'un résultat, l'anthropologie des sciences reprend ici pleinement la métaphore et se demande comment éprouver la solidité d'un objet scientifique.

Diverses procédures d'évaluation jalonnent la "carrière" d'une proposition scientifique avant d'entrer dans le panthéon de la connaissance. La recherche s'est ainsi dotée d'un ensemble d'institutions tels que les revues et les colloques scientifiques, pour organiser la reconnaissance par les pairs de telle ou telle proposition scientifique. Mais d'où viennent les forces qui permettent à cette dernière de s'imposer dans le débat ? Deux origines doivent être distinguées. Les forces externes sont issues de la réputation du lieu de production du savoir et de la revue qui l'a rendue public, du contexte médiatique plus

ou moins favorable à la visibilité d'un domaine particulier de la recherche (le champ du changement climatique bénéficiant aujourd'hui de ce contexte favorable), de l'intérêt porté par les décideurs publics sur le sujet et plus généralement de tous les éléments extérieurs à l'activité proprement dite de production du savoir mais concourant au succès d'une proposition scientifique. Tandis que les forces internes proviennent du coeur même de l'activité de recherche, comme la rigueur logique de la proposition ou la capacité à faire tenir une nouvelle mise en forme d'un problème qui apparaît comme étant plus juste que celle qui servait jusqu'alors de référence. Les découvertes scientifiques procèdent rarement par ruptures mais se présentent plutôt comme des reformulations éclairantes de problèmes et comme des nouvelles voies d'entrée vers un pan de la réalité. Ainsi, l'exigence de tisser un lien avec la réalité joue le rôle d'une force de rappel du discours scientifique. Reconnaître l'importance de ces facteurs internes pour qu'une découverte impose sa légitimité permet de récuser tout relativisme radical et d'empêcher la réduction hâtive des controverses scientifiques à des joutes oratoires ou politiques.

Appliquée à la recherche de la valeur sociale du carbone, cette grille d'analyse permet de faire émerger ce qui rend solide et pertinent un tel objet scientifique. La gageure lancée à l'économiste dans ce débat consiste, non pas à dévoiler une entité qui préexisterait à sa recherche, mais à construire un objet, en lui confiant une épaisseur empirique tangible, puis à l'imposer comme un élément qui habite le monde et qui doit peser dans le processus de décision politique et économique. Mais un tel objet ne relève pas que de l'artifice. Sa construction prend appui sur des fondations empiriques, sur des traces de phénomènes qui ont rendu manifeste l'existence d'une externalité carbone. Comme cette externalité se décline sous l'angle de ses impacts écologiques, économiques et sociaux, le concept de valeur sociale du carbone tire sa force de sa capacité à faire tenir ensemble des éléments hétérogènes en rendant visibles des phénomènes qui jusqu'à présent étaient ignorés.

Relier les émissions de carbone, la hausse des températures, les dommages économiques induits par le changement climatique, fournit une mise en forme originale de la question environnementale qui ne se réduit pas à ses dimensions physique et technique. La controverse sur la valeur sociale du carbone se trouve au croisement d'un débat plus général mêlant des aspects scientifiques, politiques et éthiques. Scientifiques puisqu'il s'agit de stabiliser une définition du phénomène ainsi qu'une méthode de mesure ; politiques car l'intégration de cette valeur dans le calcul économique public ou la mise en place d'une taxe carbone découlant de cette valeur se heurtent à des intérêts économiques puissants, à la question de son acceptabilité sociale ou encore à des enjeux de négociations internationales ; éthiques enfin, car elle met au jour les répartitions géographique et sociale inégales des dommages du chan-

gement climatique, et ouvre, à travers le débat sur le taux d'actualisation, la question non résolue de la prise en considération des générations futures dans les choix environnementaux qui sont faits aujourd'hui.

Mais s'en tenir seulement à ces critères ne saurait suffire pour évaluer les diverses valeurs sociales du carbone qui prétendent représenter la même réalité. Nous avons déjà proposé une clarification méthodologique pour ne comparer que des chiffres émanant de procédures de calcul similaires, mais il faut maintenant affiner le processus d'évaluation et par exemple comparer la pertinence heuristique de deux valeurs issues d'une ACB. Si l'anthropologie des sciences rafraîchit brillamment le portrait de l'activité scientifique, elle ne permet pas toutefois d'établir une hiérarchie indiscutable entre des propositions scientifiques concurrentes. L'analyse se borne à la description de la controverse, de son origine à son dénouement. La controverse portant sur la valeur sociale du carbone n'étant pas close, la théorie n'est pas en mesure de trancher en faveur de l'une ou de l'autre des valeurs proposées. Que le meilleur gagne en somme ! Mais ce qui nous intéresse c'est précisément de déterminer qui est le meilleur avant que l'histoire des sciences n'en décide. Ainsi, chaque valeur sociale du carbone qui prétend être un porte-parole de la réalité environnementale doit prouver sa fidélité, sa justesse.

Bien que l'anthropologie ne permette pas de conclure, elle fournit des indices éclairants sur la nature du savoir scientifique et sur la bonne place du chercheur, donc de l'économiste, dans le débat public. Une proposition scientifique qui prétendrait révéler la vérité se leurrerait sur sa mission et n'a finalement aucune chance de s'insérer au sein d'un débat politique puisqu'elle vise clairement à trancher le débat, à faire taire toute opposition au nom de la Raison. Une telle conception de la science porte en elle une charge profondément antipolitique, puisqu'une fois la vérité mise à nue, il n'y a plus de débat possible et l'espace propre à la politique se réduit comme peau de chagrin. Mais le fait que les décideurs politiques réclament des résultats chiffrés, des études scientifiques pour corroborer leur choix en matière de décision environnementale ne trahit pas une certaine tendance suicidaire de leur part, mais révèle au contraire en creux, la vraie place de la science sur la scène publique. L'absence de consensus au sein de la communauté scientifique autour de la mesure de la valeur sociale du carbone introduit un espace pour le débat politique et une ressource stratégique pour les décideurs qui vont pouvoir mobiliser telle ou telle valeur au gré de leurs intérêts. Ainsi le discours économique au sein du débat environnemental se perd à vouloir démasquer la vérité et devrait plutôt oeuvrer à promouvoir la légitimité de sa mise en forme du monde à fournir une base de discussion plus raisonnable que n'importe quelle élucubration rhétorique. La reconnaissance humble et réaliste de sa bonne place dans le débat semble nécessaire s'il veut pouvoir

prétendre "éclairer" la décision publique. Il faudra d'ailleurs revenir sur cette expression plutôt obscure en réalité pour en décrire le contenu.

3.2.2 Critique des méthodes

Après avoir précisé le sens de nos résultats et ainsi clairement circonscrit leur domaine de pertinence heuristique, nous avons sans doute gagné en lucidité. Mais demeure une question pendante : les méthodes adoptées sont-elles les plus ajustées pour résoudre le problème théorique de la détermination de la valeur sociale du carbone ? En d'autres termes, est-ce qu'une méthode concurrente pourrait produire des résultats plus robustes ? Quelle que soit la réponse, il convient d'évaluer la solidité de notre méthode.

Comme nous l'avons déjà explicité, les résultats produits sont issus d'un modèle normatif "standard" en économie d'ACB orchestrée par un planificateur bienveillant. Ce planificateur rationnel a pour mission de maximiser une fonction de bien-être social intertemporel sous des contraintes économiques et climatologiques. Ainsi la valeur sociale du carbone obtenue est le fruit d'un calcul d'optimisation. C'est à partir de ce scénario de base que nous avons modélisé une certaine représentation de l'économie. Si une telle approche paraît naturelle, et donc indiscutable, pour un économiste "bien formé", elle revient toutefois à supposer de façon implicite la supériorité des formulations normatives et mathématisées des problèmes économiques sur des formulations plus descriptives et littéraires de ces mêmes problèmes, ce qui n'a rien d'évident et doit être discuté.

L'ambition du calcul économique, exprimée par J.C.Hourcade lors d'une conférence récente sur la mesure des coûts de mitigation du climat (*Hourcade, 2007*), est de sauver le débat public des charmes de la rhétorique. Le langage naturel serait ainsi intrinsèquement plus vulnérable que le langage mathématique aux assauts de l'irrationalité. Il serait toujours menacé par une faille de raisonnement, un manquement aux principes de la rigueur logique. Tandis que le calcul économique, fondé sur toute une batterie d'équations et d'appareils de mesure objectifs pourrait se prémunir de pareilles faiblesses. Il ne s'agit pas de contester l'usage des mathématiques au sein du calcul économique, ce qui serait absurde, mais d'évaluer la pertinence du scénario dans lequel s'effectue le calcul. Ce n'est pas le calcul en soi qui pose problème. Les compétences de l'économiste comme nous le développerons plus en détail dans la dernière sous-partie, consistent précisément à mesurer, à comptabiliser, à mettre en équation des relations entre des phénomènes hétérogènes, de natures économique et physique que le seul langage naturel ne saurait démêler. Ce sont davantage les hypothèses de la fable du planificateur bienveillant qui suscite la controverse, plutôt que le recours aux mathématiques. Assimi-

ler un tel planificateur aux décideurs publics représenterait un coup de force quelque peu risible, puisque ces derniers ne sont, de toute évidence, ni dotés d'une capacité de calcul parfaite, ni orientés par un sens moral irréprochable qui les contraindrait à ne décider qu'en fonction de l'intérêt général. Il faut donc souscrire au "comme si" pour fonder le point de vue de Dieu adopté dans le modèle et ne pas borner son jugement à l'irréalisme des hypothèses. Mais mises bout-à-bout, les concessions accordées au cadre théorique du modèle normatif forment une liste assez longue : planificateur bienveillant, fonction d'utilité sociale dont le seul argument est la consommation, fiction de l'agent représentatif pour contourner les problèmes d'agrégation, fonctions de dommage et de coût d'abattement déterminées de façon *ad hoc*. En outre, dans le cadre de ce scénario bien défini par la discipline économique, le raisonnement de l'économiste est très largement balisé. La recherche des conditions d'optimalité suit la méthode classique de Lagrange et l'interprétation des résultats est prémâchée puisque leur contenu est connu par avance et commenté dans de brillants manuels (*Dasgupta et Heal, 1979*). Il ne reste alors à l'économiste plus qu'à prescrire la solution optimale.

Mais était-il possible et souhaitable de se passer de la fable du planificateur bienveillant et de la technique d'optimisation intertemporelle ? Evidemment, il faut compter et mesurer puisque l'objectif est de produire un chiffre. Mais des enquêtes empiriques d'évaluation des dommages liés au changement climatique, des coûts d'abattement à partir d'études détaillées sur les technologies disponibles et sur les coûts de transition d'une économie fortement émettrice vers une économie décarbonisée auraient pu nous fournir des informations pertinentes sur la valeur des technologies butoirs par exemple et ainsi donner une référence au débat sur les valeurs raisonnables de la tonne de carbone. Des études économétriques sur les comportements d'investissement des entreprises et de consommation des ménages auraient mis au jour de précieux indices sur les effets de l'instauration d'une taxe carbone dans l'économie réelle, sans souscrire par avance à la thèse du réflexe pavlovien de l'*homo oeconomicus* qui réagit à toute modification des signaux prix de façon optimale, c'est-à-dire en maximisant sa satisfaction. Enfin des enquêtes plus qualitatives sur l'intérêt porté par les ménages à la question du changement climatique, sur la perception du problème au sein des entreprises auraient pu être envisagées afin de préciser la notion d'"acceptabilité sociale" des décisions environnementales. De telles entreprises de collecte d'informations, et d'évaluation de la réalité environnementale sont par nature inachevées et inachevables car elles ne peuvent prétendre à l'exhaustivité et à l'épuisement du réel, surtout lorsqu'elles s'attaquent à des aspects plus qualitatifs (telles que les représentations des acteurs) ou à l'évaluation d'effets non marchands du changement climatique. Ces approches d'ingénieurs (*bottom-up*) ont le

mérite de s'ancrer résolument dans le monde. Et c'est au moment de la mise en ordre de ces différentes évaluations, de ces mesures isolées, de ces bribes de résultats qu'interviendrait le raisonnement économique exprimé en langage naturel. Que débute alors la réflexion !

Par contraste, dans la fable du planificateur bienveillant, la réflexion est apparemment réduite aux quelques acrobaties calculatoires que requiert la caractérisation de la solution optimale. Tandis que pour l'approche "*bottom up*" les connaissances seraient toujours à réinventer, le savoir étant fondamentalement ouvert à l'innovation ; pour l'approche "mainstream", le raisonnement purement économique aurait été sanctuarisé au sein de manuels prestigieux. Par conséquent, l'économiste n'aurait pas à se préoccuper du dogme (reconnaissons toutefois que sa créativité peut s'exprimer dans le choix des formes fonctionnelles du modèle qui restent libres). Au socle rassurant de la doctrine néoclassique, est substituée la lutte acharnée et périlleuse du chercheur empirique qui doit se frayer un chemin parmi les bases de données géantes recueillies de par le monde.

Après un tel réquisitoire contre la fable du planificateur bienveillant, pourquoi ne pas l'avoir vouée aux oubliettes de l'histoire des sciences ? Si nous approuvons les critiques émises précédemment, nous refusons de dénier toute pertinence aux modèles normatifs qui ne sont pas si rigides et qui peuvent même se faire les supports d'innovations conceptuelles majeures pour la discipline économique. Ainsi, plutôt que d'opposer frontalement approche empirique et approche normative il s'avère plus fécond de reconnaître que les deux approches ne visent pas le même niveau de réalité et peuvent, dans une certaine mesure, être complémentaires. En tant que métaphore, la fable du planificateur bienveillant entretient un rapport ambigu avec la réalité. A la limite, le planificateur n'a que faire du comportement réel des ménages ou de la vraie forme de la fonction de dommage. Son calcul repose sur une épure de l'économie qui ne retient de la réalité que quelques variables qui constituent la charpente du modèle. Le jeu de ces variables entre elles donne à voir des phénomènes économiques grossis, caricaturés. Ce qui compte n'est pas tant le réalisme de ces phénomènes que leurs mouvements relatifs. L'exemple de la controverse scientifique, morale et politique autour du taux d'actualisation est fort éclairant. En effet, en introduisant un taux d'actualisation au sein du modèle, l'objectif n'est pas de trancher la controverse en optant pour telle ou telle valeur mais plutôt de fournir un support clarifié au débat. Clarifié en ceci que l'analyse mathématique a permis de distinguer les composantes psychologiques du taux d'actualisation (préférence pure pour le présent, degré d'aversion à l'inégalité) de sa composante économique (taux de croissance de la consommation) sans préjuger de la valeur de ces composantes. Dès lors le débat éthique qui condamne ou justifie, au nom du droit des générations

futurs pour les uns et présentes pour les autres, un taux de préférence pure pour le présent élevé peut s'ouvrir. La question politique du niveau de redistribution des richesses choisi par une société peut être débattue. De même que les querelles d'experts sur les meilleures méthodes comptables à adopter pour mesurer le taux de croissance de la consommation ne sont nullement empêchées. Des arguments tirés de l'observation des comportements réels des agents peuvent alors nourrir le débat bien que le modèle soit par définition irréaliste. La modélisation permet ainsi de faire émerger des mécanismes complexes de façon simplifiée et ne frustre pas, par nature, les élans spéculatifs de l'économiste. C'est pourquoi le langage mathématique ne saurait avoir le dernier mot. Le langage naturel intervient dans un second temps pour mettre en mots les histoire concurrentes qui peuvent être tirées du modèle. La place est ainsi faite au raisonnement économique chargé d'éclairer le sens des relations établies par la formalisation mathématique.

D'autre part, l'approche dite "normative" est souvent soupçonnée d'être impérialiste, car elle déboucherait fatalement sur la prescription du bon comportement à suivre, et l'ACB se présenterait ainsi comme la seule méthode rationnelle d'aide à la décision. Dans le domaine environnemental, caractérisé par la présence de controverses passionnées et de situations d'incertitude radicale, une telle ambition suscite de franches réserves. L'introduction d'une dose d'incertitude dans le modèle jusqu'alors déterministe, permet, non pas de rendre compte de l'être fondamentalement chaotique du monde, mais de distribuer des probabilités subjectives sur différents états du monde, interprétés comme divers scénarii possibles, induits par des décisions politiques concurrentes. Ainsi le modèle, loin d'imposer un quelconque diktat de la raison, est suffisamment souple pour intégrer les divers projets de société qui s'affrontent au sein de l'arène publique.

Quant à la complémentarité évoquée entre cette approche et l'approche descriptive ou "*bottom up*", elle se manifeste essentiellement lors du passage à la résolution numérique du problème. Cette étape du travail se situe dans un entre-deux théorique, qui reprend la charpente conceptuelle de la fable du planificateur bienveillant tout en pouvant intégrer les résultats d'études empiriques sur l'évaluation des dommages ou des coûts d'abattement par exemple, afin de spécifier plus finement les fonctions utilisées. De plus, si les hypothèses sur l'évolution des émissions de CO₂, ou sur le progrès technique, sont cohérentes avec les choix politiques observés en matière d'environnement ou de recherche alors les résultats du modèle normatif gagnent en pertinence. Les études de sensibilité réalisées pour tester l'influence de telle ou telle spécification des paramètres ne traduisent pas seulement la méconnaissance des économistes de la forme réelle des fonctions utilisées mais peuvent être interprétées comme une méthode efficace pour prendre en considération les

diverses issues possibles aux négociations et aux processus de décision, et ce, grâce à la plasticité du modèle.

Ainsi la fable du planificateur bienveillant se condamnerait au non sens si elle prétendait être le reflet parfait de la réalité et tentait de se justifier par une prétendue supériorité théorique sur tout modèle positif. En revanche l'usage lucide de la méthode, en faisant du modèle, comme nous le proposons dans cette étude, le support théorique assaini des controverses scientifiques, éthiques et politiques qui animent la question environnementale, présente des vertus heuristiques indéniables.

3.3 Du rôle et de la bonne place de l'économiste au sein du débat environnemental

Comme nous l'évoquions dès l'introduction du mémoire, les économistes prétendent que leurs résultats peuvent servir de guides à l'action publique en matière d'environnement. Ils tireraient leur légitimité à intervenir dans le débat de certaines compétences propres à la discipline économique en matière de rationalisation des choix collectifs, et d'évaluations des politiques publiques. Le retentissant rapport Stern consacre la place prépondérante acquise par les économistes dans le débat sur le changement climatique au détriment des experts issus des sciences physiques. Nous souhaitons dans cette dernière sous-partie comprendre ce que signifie "éclairer la décision" pour les résultats produit par l'économiste afin d'assigner à ce dernier sa bonne place au sein du débat. Nous montrerons que son rôle n'est pas de se substituer au décideur mais plutôt d'accepter humblement une mission de médiateur.

3.3.1 Recensement des compétences de l'économiste

Dans un chapitre de *Politique de la Nature*, Bruno Latour (*Latour*, 1999b) est amené à réorganiser la division du travail scientifique et à réassigner à chacune des parties prenantes du débat public sa bonne place. Nous proposons de tester la pertinence du paragraphe consacré à la "contribution des économistes" à l'aune de notre travail sur la valeur sociale du carbone.

Les économistes contribueraient à scénariser le monde, en désignant clairement les entités qui y composent un rôle. Les hypothèses qui fondent leurs modèles sont souvent taxées de réductionnisme, de simplisme ou d'irréalisme, mais auraient l'avantage de dramatiser les problèmes, d'en exacerber les contours afin de les rendre plus visibles au yeux des décideurs publics et du public en général. Ainsi, le chiffre censé représenter la valeur monétaire de la tonne de carbone n'a pas qu'une signification technique. En intégrant le

débat public il cristallise en lui tous les enjeux du changement climatique. Il devient alors une valeur tutélaire à partir de laquelle il est possible de calculer le coût social des diverses activités humaines en fonction des émissions de carbone qu'elles engendrent. Une telle valeur donne à voir au public les effets environnementaux de son comportement dans une unité de mesure familière, l'unité monétaire.

Nous touchons là une seconde contribution fondamentale de l'économiste qui consiste à élaborer un langage commun. Par une succession d'opérations de traduction, et de normalisation, depuis des bases de données géantes jusqu'à la production d'un chiffre, il rend comparables des entités hétérogènes. La valeur du carbone est en effet traversée par des controverses scientifiques à propos de la sensibilité climatique, par des querelles éthiques autour de la question du bon taux d'actualisation à retenir et enfin des conflits politiques qui opposent les peuples lors des négociations internationales qui visent à définir des mesures de lutte collective contre le changement climatique. Le calcul économique n'a pas pour vocation de révéler la valeur profonde des choses, la distance entre l'être des choses et une feuille de calcul est assez grande pour que toute confusion soit écartée, mais d'offrir une métrique commune aux parties prenantes du débat. Ici la métrique commune est le dollar. Notons qu'en amont du débat public, la définition des outils qui fondent le calcul économique fait l'objet d'une négociation interne aux économistes. Ainsi la question de savoir s'il faut inclure ou non une variable de qualité de l'environnement au sein de la fonction d'utilité n'est pas encore close. Si l'évaluation monétaire des effets environnementaux du changement climatique relève de la gageure théorique et implique de nombreuses simplifications, elle offre toutefois un formidable outil de comparaison des scénarii qui s'affrontent dans le débat. Comme l'incertitude portant sur les futurs états du monde ne peut être complètement levée, de telles évaluations ne peuvent servir qu'à comparer les scénarii et en aucun cas ne peuvent invoquer une norme universelle de la nature pour trancher le débat politique et décréter que telle version du monde est nécessairement la bonne version à retenir. La vérité de telle ou telle valeur du carbone n'a que le caractère justifiable d'un calcul puisqu'elle ne tire sa cohérence que de certaines conventions de calcul qui peuvent toujours être remises en cause.

Enfin, troisième contribution majeure de l'économiste, la modélisation des relations entre "humains" et "non humains" selon la terminologie latourienne permet de rendre visibles des conséquences qu'aucune autre méthode n'aurait pu révéler. L'économiste serait toujours à l'affût des attachements possibles entre humains et non humains et débusquerait ainsi les menaces potentielles, les seuils à ne pas franchir. Les modèles intégrés que nous avons utilisés correspondent parfaitement à cette description puisqu'ils mettent en

relation des phénomènes physiques avec des phénomènes économiques afin de mettre au jour une externalité, qui jusqu'à présent était ignorée, à travers la mesure de la valeur sociale du carbone. Rendre manifeste l'existence d'une telle externalité et évaluer ses conséquences en termes de dommages économiques et écologiques autorise l'économiste à dénoncer les contradictions du développement des sociétés industrielles. L'économiste se fait alors éveillé de conscience pour inciter à l'action en faveur de l'environnement ou démystifier les voix de Cassandra. Chaque modélisation raconte une certaine histoire et opte pour un certain point de vue. Ainsi, la représentation du monde produite par un modèle qui intègre une fonction de dommages quadratique n'est pas la même que celle issue d'un modèle avec une fonction de dommage à effet de seuil, ou plutôt, les deux représentations n'impliquent pas les mêmes réponses. Une ACB ne produit pas les mêmes valeurs qu'un calcul le long d'un scénario "au fil de l'eau" et donc ne conduit pas aux mêmes recommandations. C'est pourquoi la modélisation est un catalyseur ou une matrice de débats. La souplesse de son usage lui permet d'intégrer et de cartographier les diverses positions qui s'affrontent. Elle les rend ainsi comparables aux yeux des décideurs publics et de l'opinion en général.

En somme, par sa capacité à scénariser le monde, le travail de l'économiste est profondément politique, il donne à voir des formes du monde possibles et offre une formidable occasion d'exploration, toujours renouvelée, du meilleur des mondes possibles. Voilà la contribution hautement politique du raisonnement économique. Et B.Latour de conclure que "l'économie n'est plus politique : elle ne dicte plus ses solutions terrifiantes au nom des lois d'airain extérieures à l'histoire, à l'anthropologie et à la vie publique : elle participe humblement au formatage progressif des problèmes (B.Latour, 1999, p.209).

3.3.2 Du bon usage des résultats de l'économiste au sein du monde réel

Une fois que l'économiste a fait parler son modèle, qu'il lui a extorqué, au prix d'une négociation musclée, des valeurs possibles de la tonne de carbone, nous nous interrogeons sur l'usage qu'il peut être fait de ces valeurs, non seulement dans le débat public, mais aussi au sein de l'économie réelle. Le transfert sans précaution dans le monde réel, de valeurs qui tirent leur cohérence et leur sens d'un jeu d'hypothèses donné, est-il pertinent ? Les décideurs publics sont demandeurs de tels chiffres, mais que peuvent-ils en faire ? Ont-ils raison de s'en servir ? En quoi ces valeurs sont plus crédibles que toute autre ? Si de telles valeurs prétendent pouvoir servir de guide à l'action, il nous faut analyser précisément ce qu'"éclairer la décision" signifie.

Produit par des procédures sophistiquées attestant de sa solidité ou de sa densité scientifique, la valeur chiffrée jouit d'une crédibilité certaine auprès de l'opinion. Pourtant, elle n'a de sens que dans le cadre très restreint de son modèle géniteur. Tandis qu'une fois transformée en taxe carbone par exemple, elle devient un signal concret pour les agents économiques et produit des effets réels sur les comportements économiques. Mais a-t-elle été conçue pour cela ? Il nous semble qu'une fois projetée dans l'économie réelle la valeur du carbone se heurte à un niveau de réalité qui lui est étranger. Si la valeur de la taxe pigouvienne permet de décentraliser l'optimum dans le cadre de notre modèle normatif avec agent représentatif maximisateur d'utilité, il y a peu de chance pour que la même valeur produise les mêmes effets au sein de l'économie réelle. Les agents économiques prennent leurs décisions en fonction de critères multidimensionnels dont le modèle normatif ne peut rendre compte pleinement. De même que les décideurs publics ne se comportent pas comme le planificateur bienveillant et la fixation des taxes et autres instruments de politiques environnementales répond à d'autres objectifs que la seule internalisation des externalités. C'est pourquoi dans l'économie réelle il est très difficile d'instaurer une taxe pigouvienne, ce qui n'est de toute façon pas forcément souhaitable puisqu'elle ne produirait pas les effets escomptés par la théorie. En dépit de ces remarques bien connues, les décideurs publics et économiques réclament auprès des chercheurs la production de valeurs crédibles du carbone qu'ils pourront intégrer à leurs calculs d'évaluation de projets d'investissement. Comme le CO₂ occupe désormais le centre du débat médiatique autour du changement climatique, il convient de prendre en considération cette externalité au sein des calculs économiques privé et public. Des enjeux financiers considérables sont ainsi attachés à la fixation d'une valeur du carbone qui servirait de référence aux acteurs économiques du monde entier. Que les économistes affûtent leurs outils, qu'ils révisent leurs théorèmes et qu'ils dressent leurs ordinateurs, car la communauté internationale convoque leur savoir-faire pour reconnaître à une entité rebelle, le carbone, une valeur monétaire qui soit légitime aux yeux de tous.

Face à de tels défis économiques et intellectuels, il semble normal qu'un peu de rigueur soit exigée et qu'on ne se lance pas dans une pareille entreprise à l'aveugle. Il faut que la valeur élue prouve sa solidité et donc sa réalité dans le sens, commenté précédemment, que l'anthropologie des sciences donne à ces termes. Après maintes transformations calculatoires, suivies de quelques opérations de calibration numérique, la valeur produite est éclatante, le chiffre resplendit. Il résume à lui seul, une somme d'informations considérable et c'est lui qui est présenté comme le fruit de la recherche ou même sa pépite. Ainsi, le chiffre fascine. Il rayonne et éblouit. Au point que certains dénoncent l'aveuglement des décideurs, qui, trompés par son éclat, en feraient un usage

illégitime. La force hypnotique du chiffre ne doit pas lui conférer des pouvoirs indus. A la production rationnelle de résultats scientifiques succéderait ainsi l'usage passionnel de ces mêmes résultats par les acteurs du débat environnemental. Si la valeur du carbone doit éclairer le débat, un réglage subtile de l'éclairage s'impose pour ne pas brouiller complètement la décision. Certains commentateurs vont plus loin encore (*Ekins*, 2005) et dénie tout lien avec la réalité environnementale à toute valeur du carbone produite par les méthodes standard de la science économique. Le raisonnement marginaliste qui s'applique dans ces méthodes serait incapable de saisir la nature des phénomènes écologiques, traversés par des effets de seuil, ou d'irréversibilité. La seule démarche scientifique pertinente consisterait ainsi à révéler les menaces écologiques qui pèsent sur le monde afin de mieux les éviter. Mais la valeur optimale du carbone, celle qui égalise la valeur présente du dommage lié à l'émission d'une unité supplémentaire de carbone au coût d'abattement de cette même unité, n'aurait aucune réalité environnementale car les émissions ne sont pas divisibles et les dommages sont par nature chaotiques.

Confier à la valeur du carbone un sens métaphysique relève évidemment de l'aveuglement positiviste et aucun décideur public n'a la naïveté de prendre au sérieux une telle interprétation. D'autant qu'elle porte en elle l'ambition de trancher le débat public et de faire taire les porte-parole politiques qui jouent avec les passions de l'opinion et ne feraient que retarder l'avènement du règne de la Raison. Mais la politique ne cède pas devant les assauts du positivisme et manie avec habileté les controverses scientifiques qui déchirent les "tribus" d'économistes. Elle peut réclamer la production d'une valeur tutélaire pour l'intégrer dans le calcul économique public et s'accomoder parfaitement de l'ample fourchette des estimations de cette valeur, pouvant ainsi exhiber stratégiquement une valeur de cette fourchette en fonction de ses desseins. L'économiste modélisateur qui a fait le deuil du positivisme, voudrait cependant ne pas renoncer à faire progresser le calcul économique et à le préserver de telles manipulations. Pour cela il doit faire preuve de pédagogie et faire comprendre aux décideurs que la valeur qu'il produit n'est pas le reflet de la réalité, qu'elle ne possède qu'une vérité relative à un modèle, mais qu'en dépit de ces limites elle est plus sensée que n'importe quelle valeur qui serait choisie au hasard. Ces précisions nécessaires apportées, le chiffre traduisant la valeur du carbone ne peut plus prétendre posséder une réalité en soi, une existence autonome. Pour autant il n'est pas inutile. L'évaluation des projets d'investissement ne peut plus faire l'économie d'une prise en compte de l'externalité carbone et même si la valeur du carbone construite par les économistes n'a pas d'existence autonome, sa solidité a été éprouvée au cours de procédures scientifiques rigoureuses et permet de rendre comparables des projets d'investissement en intégrant une dimension environnementale nou-

velle.

La valeur sociale du carbone doit ainsi se contenter d'une humble mission. Eclairer la décision ne signifie pas prendre la décision à la place des décideurs mais donner les moyens aux décideurs de réaliser un choix raisonné entre des options clairement identifiées.

3.3.3 Le rôle de médiateur de l'économiste

Une description réaliste du rôle de l'économiste dans le débat public fait souvent défaut alors qu'elle semble nécessaire pour répondre aux prétentions exagérées dont il se targue parfois. En participant à la mise en forme des problèmes environnementaux, le travail de l'économiste est viscéralement politique, mais les résultats de l'économiste ne sauraient en aucun cas se substituer à la politique. Pour se prémunir du risque d'impérialisme de l'économiste, une analyse plus normative de la "bonne" place de l'économiste dans le débat s'impose. Une telle analyse ne vise pas tant à modifier le réel et l'activité concrète des économistes, car ce sont les économistes qui connaissent le mieux leur métier, qu'à décaler les cadres de perception de cette activité afin de lui assigner des frontières plus claires en fonction des compétences spécifiques que nous avons distinguées précédemment. Nous proposons le terme polysémique de "médiateur" pour qualifier le rôle de l'économiste.

Le médiateur est toujours celui qui occupe une position d'entre-deux et qui relie plusieurs éléments hétérogènes. L'économiste-médiateur assure le passage au sein du débat environnemental entre le monde de la science physique et le monde de la décision politique mais aussi plus généralement entre la réalité environnementale et l'activité humaine.

Pour assurer le dialogue entre la science et la politique, il invente un langage commun : le médiateur se fait alors traducteur. Le cycle du carbone et la sensibilité climatique sont intégrées au sein d'un modèle de croissance qui produit la valeur en dollars de la tonne de carbone. L'économiste rend ainsi le discours scientifique moins ésotérique et propage au sein du débat politique des représentations scientifiques de la réalité environnementale. D'autre part, à travers des opérations de traduction l'économiste fait coller une valeur monétaire à la réalité environnementale et fait ainsi parler le monde dans la langue de la monnaie internationale.

Par ailleurs, l'objectif plus théorique de l'économiste consiste à assurer la cohésion (faire tenir ensemble des éléments hétérogènes) et la cohérence (donner du sens) de son opération de traduction de la réalité environnementale. Depuis le recueil des données physiques et économiques, jusqu'à la production de la valeur sociale du carbone, il a fait circuler et a transformé de l'information. Une traduction n'est réussie que si quelque chose de constant

est conservé au cours du processus de circulation et de transformation de l'information. C'est précisément ce "quelque chose" qui fait le pont entre la valeur monétaire et la réalité physique du carbone afin que celle-ci ne perde pas tout lien avec celle-là. Plutôt que d'occulter la fabrique du chiffre au sein d'une boîte noire, l'économiste peut revendiquer la transparence de sa démarche et garantir la traçabilité de l'information utilisée. Une telle mise au jour de son travail lui permet de justifier l'ancrage empirique de sa valeur. Remarquons que ce lien avec le réel peut être très ténu, comme c'est le cas pour notre valeur du carbone, finalement très abstraite car produite au sein d'un modèle normatif; mais il est toujours possible de remonter les étapes de la traduction et d'identifier l'origine et la nature de l'information qui circule dans le modèle.

Confier à l'économiste une humble mission de médiation ou de traduction pour le détourner de ses désirs impérialistes ne signifie pas qu'il est alors priver de tout pouvoir. Le médiateur ne saurait être parfaitement neutre. Toute traduction implique une déformation ou pire une trahison. L'économiste fournit aux parties prenantes du débat environnemental un langage commun pour parler du monde et des lunettes pour l'observer. Mais les lunettes ont peut-être des verres déformants, de même que le langage qui préformate les débats définit largement et réduit l'espace des possibles et donc des décisions raisonnables qui seront adoptées. En se faisant le porte-parole autorisé de la réalité environnementale, l'économiste occupe une position stratégique certaine et possède un pouvoir potentiel sur le déroulement et l'issue des débats.

Légitimée par le critère général de la rationalité et celui plus particulier de l'efficacité économique, l'intervention de l'économiste compte et peut peser dans les choix des décideurs. Mais cette légitimité ne vaut que tant que la loyauté du porte-parole vis-à-vis de son mandataire n'est pas remise en cause. Si des doutes émergent sur la fidélité du message qu'il transmet alors sa crédibilité ainsi que son pouvoir s'amenuisent. Comme la communauté des économistes ne parle pas d'une même voix, ce qui est plutôt heureux, différentes traductions du monde, différents porte-parole de la réalité environnementale sont en concurrence. C'est pourquoi les économistes peuvent difficilement acquérir un pouvoir décisif et sont réduits à n'être que les hérauts de visions du monde particulières. Leurs discours ne peuvent prétendre à l'universalité promise par la Raison mais sont des traductions rationalisées de ces visions particulières. Que les décideurs se rassurent, les interprètes de la nature ne leur subtiliseront pas le pouvoir. Les économistes proposent mais la politique ne cessera de disposer.

Faut-il le déplorer? L'avènement du règne des économistes et du calcul économique comme norme d'évaluation ultime du débat politique n'est certainement pas souhaitable et le comportement réel des décideurs politiques et

économiques confirme quotidiennement que le discours économique est loin de le gouverner. En revanche, promouvoir le rôle de médiateur de l'économiste tel que nous l'envisageons nous semble offrir un intérêt social évident. L'économiste-médiateur ne se cantonne pas seulement au rôle de l'interprète fidèle de la réalité, mais joue un rôle fondamentalement actif. Il intervient dans le débat pour proposer un langage commun aux différentes parties prenantes. Pour qu'un accord soit trouvé, il doit ménager un terrain d'entente entre les divers intérêts qui divisent la communauté humaine et la nature, grignotée à petit feu par la gourmandise ou la voracité des hommes.

Conclusion

Notre étude n'a pas accouché de faits scientifiques indiscutables. Il n'en ressort aucune certitude. Loin d'être un aboutissement ou une invitation au repos mérité du chercheur abasourdi, elle suscite de nouvelles questions. Quel taux d'actualisation retenir en contexte de changement climatique ? Quel est le bon profil de la valeur sociale du carbone ? Comment évaluer plus précisément les dommages du changement climatique ? Que le travail commence en somme !

Notre mémoire constitue une propédeutique nécessaire mais non suffisante.

La phase analytique nous a permis de poser le problème de façon épurée, de démêler les composantes du prix implicite du carbone et du taux d'actualisation, de localiser les effets de l'incertitude sur le modèle et finalement de définir un programme de recherche pertinent.

Pour répondre aux questions non résolues par l'approche analytique, nous avons élaboré un modèle économie/climat numérique dont l'objectif est de répondre à des questions scientifiques précises. Il a fallu alors déterminer une stratégie numérique capable de forcer les données disponibles à produire du sens. En guise de résultats nous avons commenté des graphiques qui fournissent une intuition du rôle déterminant de l'incertitude portant sur la sensibilité climatique. Notre principal résultat établit que le taux d'actualisation n'est que très peu affecté par les effets du changement climatique dans le cas d'une sensibilité climatique faible car les coûts d'abattement et les dommages ne sont pas suffisants pour peser sur le taux de croissance de la consommation par tête ; alors qu'une sensibilité climatique catastrophique introduit des effets de seuil qui font potentiellement exploser la VSC et perturbe significativement la valeur du TAS.

Toutefois, ces graphiques ne représentent que des esquisses de résultats. Il conviendrait de mesurer précisément les effets des formes fonctionnelles retenues, de mener des analyses de sensibilité systématiques pour distinguer ce qui relève de l'arbitraire des choix de modélisation de ce qui résiste à chaque nouvelle spécification du modèle et qui pourrait ainsi constituer un socle de connaissances en matière d'économie du changement climatique.

Si un tel objectif peut paraître bien ambitieux, il doit être nourri d'une réflexion sur la nature du savoir produit par l'économiste. Le troisième chapitre, beaucoup plus bavard que les deux précédents, place notre démarche au sein d'un champ de recherche traversé de controverses brûlantes. Il donne un bref aperçu de l'état de l'art et se présente comme un détour réflexif sur le sens de l'approche économique de la question environnementale. L'économiste-médiateur proposerait ainsi des traductions de la réalité écologique dont la

fidélité serait toujours à éprouver dans le cadre de procédures scientifiques, et à justifier au sein du débat public par rapport à des visions du monde concurrentes.

Bibliographie

- Ambrosi, P., J.-C. Hourcade, S. Hallegatte, F. Lecocq, P. Dumas, et M. Ha-Duong, Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate change, *Environmental Modeling and Assessment*, 8(3), 135–147, doi :10.1023/A :1025586922143, special Issue on Modeling the economic response to global climate change, 2003.
- Chirac, J., Discours de M. Jacques Chirac Président de la République devant l’assemblée plénière du sommet mondial du développement durable, johannesburg, 2002.
- Dasgupta, P., Comments on the Stern review’s economics of climate change, *National Institute Economic Review*, 199, 4–7, 2007.
- Dasgupta, S., et G. Heal, *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press, 1979.
- Desrosières, A., *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*, 440 pp., La Découverte, Paris, 1993.
- Ekins, P., A note on the impossibility of deriving a scientifically valid, ethically sound or policy-useful estimate of the social cost of carbon, *technical note*, Policy Studies Institute, 2005.
- Gadrey, J., et F. Jany-Catrice, *Les nouveaux indicateurs de richesse*, Repères, 128 pp., La Découverte, 2005.
- Godard, O., Climat et générations futures. Un examen critique du débat académique suscité par le rapport stern, working paper, 2007.
- Hourcade, J.-C., *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, chap. Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l’effet de serre, Coédition INRA-MSH et association Natures, Sciences, Sociétés-Dialogues, 1996.

- Hourcade, J.-C., Parlez-moi de coûts : réflexions autour d'une source de schizophrénie collective, séminaire IDDRI, 2007.
- Koopmans, T. C., Stationary ordinal utility and impatience, *Econometrica*, 28(2), 287–309, 1960.
- Kuhn, T. S., *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd, november 1996 ed., 212 pp., University of Chicago Press, 1962.
- Latour, B., *Science in Action. How to Follow Scientists and Engineers through Society*, Harvard University Press, 1987.
- Latour, B., *Pandora's Hope. Essays on the Reality of Science Studies*, Harvard University Press, Cambridge, 1999a.
- Latour, B., *Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie*, La Découverte, Paris, 1999b.
- Latour, B., et S. Wooglar, *Laboratory Life : the Social Construction of Scientific Facts*, 260 pp., Sage, Los Angeles, Londres, 1979.
- Maddison, D., Further comments on the stern review, working paper, 2007.
- Nordhaus, W. D., An optimal transition path for controlling greenhouse gases, *Science*, 258, 1315–1319, 1992.
- Nordhaus, W. D., The Stern review and the economics of climate change, working paper, Yale University, 2007.
- Nordhaus, W. D., et J. Boyer, *Warming the world : economic models of climate change*, MIT Press, 1999.
- Pearce, D. W., The social cost of carbon and its policy implications, *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 362–384, 2002.
- Ramsey, F. P., A mathematical theory of savings, *Economic Journal*, 38, 543–559, 1928.
- Stern, N., *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, 712 pp., Cambridge University Press, 2006.
- Tol, R. S. J., et G. W. Yohe, The Stern report : a deconstruction, working paper, 2007.
- von Neumann, J., et O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton, 1944.

Weitzman, M. L., The role of uncertainty in the economics of catastrophic climate change, working paper, 2007a.

Weitzman, M. L., The Stern review of the economics of climate change, *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686–702, 2007b.

Yohe, G., Some thoughts on the damage estimates presented in the Stern review, *The Integrated Assessment Journal*, 6, 65–72, 2006.