

Université de PARIS I / Panthéon-Sorbonne

Sciences économiques

Sciences humaines - Sciences juridiques et politiques

Analyse économique de l'effet de serre

Thèse pour le Doctorat en Economie

(arrêté du 30 mars 1992)

présentée et soutenue par Sébastien Rouillon

Directeur de recherche : Professeur Duc Loï Phan

Jury :

L'Université de PARIS I / Panthéon-Sorbonne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Je remercie le Professeur Duc Loï Phan pour ses conseils avisés, ses encouragements et son soutien constant au cours de la préparation et de la rédaction de cette thèse. Je remercie également le Professeur Nguyen Manh Hung et le Professeur Antoine d'Autume pour leurs commentaires. Mes remerciements vont aussi aux membres du LAMIA et du MAD, plus particulièrement à Olivier Marchand et Emmanuelle Taugourdeau.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé, directement ou indirectement, à achever ce travail.

Toute ma reconnaissance à Magalie et Hugo, pour leur patience et leur soutien affectif !

Introduction générale

Les limites de la croissance économique liées à l'environnement suscitent depuis bien longtemps des inquiétudes, sans pour autant avoir toujours été une préoccupation de premier plan ; cela est peut-être en train de changer. Au cours des trois dernières décennies, grâce notamment à la conquête spatiale, qui permet d'ausculter notre planète en temps réel (observation par satellites de l'atmosphère, du rythme de déforestation...), les preuves scientifiques s'accumulent et ne cessent de confirmer les tensions écologiques naissantes. Les informations rassemblées mettent à jour, tour à tour, des pollutions d'un genre nouveau : les pluies acides, la raréfaction de l'ozone troposphérique¹, la disparition d'espèces animales et végétales, les déchets nucléaires, l'accroissement de l'effet de serre... Ainsi, de locales, les pollutions deviennent globales et la preuve est faite que l'activité humaine provoque des problèmes écologiques majeurs, susceptibles de modifier durablement la biosphère².

Les craintes écologiques diffuses du passé ont donc mué en une prise de conscience générale de plus en plus nette, à laquelle les décideurs politiques, les agents économiques et la communauté scientifique sont parties prenantes. La Conférence de Stockholm sur l'environnement et le développement, qui s'est tenue en 1972, marque le début d'un mouvement tendanciel qui ne faiblit pas, symptomatique des préoccupations des dirigeants. De très nombreuses rencontres internationales, générales ou sectorielles (couche d'ozone, réserves halieutiques, biodiversité, pluies acides, pollutions atmosphériques, effet de serre) ont ainsi été organisées ; des progrès ont été réalisés, dont le plus éclatant est le Protocole de Montréal sur la couche d'ozone. Bien entendu, cette densification des négociations internationales sur l'environnement répond, avant tout, aux attentes du public. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si elle coïncide avec la montée en puissance des mouvements écologiques, très nette à partir des années 70. Plus anecdoctique, mais tout de même un signe

¹ - Troposphère : Couche atmosphérique la plus voisine de la Terre, dont l'épaisseur augmente du pôle (5 km) à l'équateur (18 km).

² - Biosphère : Réunion de tous les écosystèmes. S'entend au sens large (non limité à la matière vivante) et global (l'échelle de la planète) (Faucheux & Noël, 1995).

des temps, l'imaginaire collectif s'imprègne peu à peu de ces risques écologiques : le cinéma hollywoodien ne s'y est certainement pas trompé en s'emparant de ces craintes pour offrir aux spectateurs des films-catastrophes à succès³. Enfin, la communauté scientifique n'est pas à l'écart de ces tendances sociologiques générales. Pour preuve, on pourrait mettre en avant la prolifération des publications sur ces sujets ou la création de revues spécialisées.

Le sujet de cette thèse s'insère dans cette vague de fond. En amont, c'est avant tout l'actualité de ce débat et l'effort scientifique mondial impulsé par la Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992) qui nous l'a inspiré. Ensuite, c'est la très grande diversité des thèmes connexes qui rend cette réflexion passionnante : externalité, pollutions cumulatives, épuisement des ressources fossiles, développement soutenable, catastrophes écologiques et irréversibilité, incertitude, négociations internationales...

* *
*

L'économie de l'environnement, telle que l'a orientée Pigou (1920), décline à l'infini le concept d'externalité. Selon Pigou, une externalité se rencontre chaque fois qu'un agent économique modifie le bien-être d'un autre agent économique, sans que cette interdépendance soit compensée par le jeu d'un échange. Plus précisément, pour le cas qui nous intéresse, le premier, appelé le pollueur, réduit le bien-être du second, appelé le pollué, en rejettant dans l'environnement un polluant. Pour Pigou et les économistes qui ont poursuivi son raisonnement, cette situation n'est pas souhaitable car elle produit une divergence entre le coût privé et le coût social de l'activité du pollueur. Les recommandations de Pigou, en pareil cas, sont bien connues : l'écart entre les coûts privés et sociaux de la pollution doit être comblé ; on parle alors d'internalisation des coûts externes. Pigou choisit la solution d'une taxe frappant le pollueur, égale à la différence entre les coûts marginaux sociaux et privés, appelée aujourd'hui taxe Pigovienne.

³ - Dans le film “Highlander II”, le monde survit sous un bouclier protecteur construit pour remplacer l'écran naturel de la couche d'ozone. Dans “WaterWorld”, l'humanité disparaît après l'élévation du niveau des océans.

Coase (1960) propose une interprétation adverse. Il prouve que, en l'absence de coûts de transaction et de comportements stratégiques, les externalités de pollution se règlent d'elles-mêmes, grâce à une négociation bilatérale entre le pollueur et le pollué. Ce marchandage peut avoir deux issues. Le pollueur peut convaincre le pollué de recevoir une indemnité pour acquérir le droit de polluer. Le pollué peut proposer au pollueur de verser une somme négociée pour qu'il cesse de polluer. En poussant le raisonnement plus loin, l'argument Coasien conduit à nier l'existence des externalités : si une pollution existe, c'est que les coûts de transaction excèdent les gains de la non-pollution ; sinon, les diverses parties impliquées auraient trouvé un arrangement.

De fait, la plupart des pollutions peuvent être classées dans la catégorie des externalités publiques⁴, si bien que les négociations pollueurs-pollués échouent nécessairement, en raison du nombre élevé des parties concernées : les coûts de transaction sont importants ; la multitude génère des comportements stratégiques, comparables à ceux qui apparaissent dans le financement des projets publics. Faut-il en conclure, comme le suggère Coase, que rien ne doit être tenté pour combattre la pollution ? Cette question est sans réponse dans le cas général puisque, comme l'indiquent Pearce & Turner (1990), la démonstration de Coase est irréfutable. Toutefois, en ce qui concerne l'effet de serre, elle est irrecevable puisque les pollueurs, la génération présente, ne rencontreront jamais les pollués, les générations futures : il ne saurait donc être question de négocier !

Outre cet argument, d'autres raisons peuvent justifier une intervention publique pour lutter contre la pollution. Certains économistes expliquent les externalités par l'absence de normes sociales clairement définies : non-appropriabilité (Bator, 1958) ; marché manquant (Mäler, 1990) ; absence ou mauvaise définition des droits de propriétés (Dales, 1968). Ces carences institutionnelles freinent ou empêchent les négociations volontaires entre pollueurs et pollués (d'ailleurs, les différends se règlent souvent par tribunaux interposés). Le rôle institutionnel des pouvoirs publics légitime alors son action. Ainsi, Dales suggère de résoudre certaines externalités par une redéfinition autoritaire des droits de propriété. Il est l'instigateur de la

⁴ - Une externalité publique est une externalité telle que l'arrivée d'une nouvelle victime laisse inchangée la perte de bien-être ressentie par les autres victimes.

notion de droits de polluer négociables et de la création d'un marché pour les échanger, comparable au marché boursier. Dales suggère ici un moyen concurrent d'internalisation des coûts externes d'une pollution.

Le renforcement de l'effet de serre s'analyse comme une externalité :

1. publique, car les changements climatiques lèsent tout le monde indifféremment ;
2. dynamique (Pearce, 1976), parce que les dommages climatiques dépendent de l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et parce que leur durée de vie atmosphérique est longue ;
3. transfrontière globale, car chaque pays est à la fois source et victime de la pollution (Mäler, 1990).

Plourde (1972) et Forster (1973) imaginent un cadre de réflexion approprié pour analyser une pollution cumulative. Forster construit un modèle économique reliant les flux de consommation à l'accumulation progressive d'un polluant quelconque. L'objectif social se définit alors comme la recherche du sentier de consommation maximisant le bien-être intertemporel du consommateur, sachant que son utilité dépend, bien évidemment, de sa consommation mais, aussi, de la pollution. La résolution de ce programme d'optimisation intertemporel utilise la théorie du contrôle optimal (Pontriagine & alli, 1961).

Le modèle de pollution cumulative s'interprète facilement à l'aide des concepts traditionnels de l'économie de l'environnement. Pourtant, la notion de coût social de la pollution, introduite par Pigou, s'identifie mal dans le cas d'une externalité dynamique, puisque les conséquences de la pollution perdurent. En fait, le modèle de pollution cumulative la redéfinit comme le coût marginal intertemporel de l'accumulation du polluant, i.e. comme la somme actualisée des flux de dommages marginaux futurs⁵. Partant de là, le concept d'externalité s'applique facilement aux pollutions cumulatives : en l'absence d'intervention publique, le producteur pollue jusqu'au point où la productivité marginale de l'émission est nulle ; ce coût

⁵ - Ce coût marginal intertemporel peut être vu comme une application de la règle d'agrégation de Samuelson, en considérant que le consommateur est un individu différent à chaque instant, auquel on attribue un coefficient de pondération reflétant le mécanisme d'actualisation.

marginal privé est inférieur au coût social intertemporel ; il y a donc bien divergence entre le coût social et le coût privé de l'activité polluante.

L'arbitrage intertemporel décrit par le modèle de pollution cumulative n'est pas différent de celui du modèle de Ramsey (1928). Dans ce dernier, l'utilité de la dernière unité de consommation est mise en balance avec l'utilité intertemporelle de la dernière unité d'épargne. L'idée sous-jacente est que, au-delà d'une certaine limite, la consommation présente n'est plus bénéfique, car le rendement futur de l'investissement lui est supérieur. Arrow (1995) compare la lutte contre l'effet de serre (et, par extension, contre toute pollution cumulative) à un investissement public ; elle produit un coût économique présent accepté en vue de bénéfices, en terme de dommages climatiques évités, qui ne se réaliseront que dans un avenir lointain. Techniquement, l'arbitrage intertemporel correspondant consiste à comparer l'utilité de la dernière unité de consommation au coût intertemporel de la dernière unité de gaz à effet de serre, qui définit le prix implicite de la pollution. Le comportement optimal consiste à émettre le polluant jusqu'à ce que son utilité marginale égale cette valeur.

Une littérature relativement abondante a aménagé le modèle de pollution cumulative dans de nombreuses directions spécifiquement pour décrire l'effet de serre. Les améliorations apportées concernent (cette liste n'est pas exhaustive) :

1. le mécanisme de recyclage naturel du stock de pollution : strictement persistant dans Hoël (1991b) ; recyclage constant dans Mäler (1991) ; taux de recyclage constant dans Cesar (1994), Falk & Mendelsohn (1993), Gottinger (1991), Tahvonen(1994) et Ulph & Ulph (1994) ; recyclage logistique dans Cesar (1994) ; fonction de recyclage complexe, faisant apparaître des équilibres multiples, dans Barbier & Markandya (1990).
2. la prise en compte de l'interaction entre l'épuisement des ressources fossiles, principales sources d'émission de gaz à effet de serre, et les changements climatiques : Sinclair (1994), Farzin & Tahvonen (1996) et Ulph & Ulph (1994) ;
3. la prise en compte des menaces de catastrophes et des incertitudes scientifiques : Clark & Reed (1994), Gottinger (1991), Pethig (1991b) et Roe & alli (1994).

A côté de cette réflexion théorique, une littérature économique encore plus fournie est consacrée à la quantification des coûts et/ou des avantages de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La première tentative est déjà ancienne et revient à Nordhaus (1977). L'auteur suppose que l'accumulation du carbone atmosphérique ne doit pas dépasser, à long terme, une valeur “raisonnable”⁶. Sur la base d'une spécification linéaire des fonctions du modèle, il calcule l'incitation fiscale nécessaire au respect de la contrainte, i.e. la taxe sur le contenu en carbone, et le coût économique de la mesure. Les études ultérieures sont beaucoup plus sophistiquées et réalistes. Parmi celles-ci, deux problématiques différentes doivent être distinguées.

Les modèles d'équilibre général appliqués de Barns & alii (1993), Manne (1993), Oliveira-Martins & alii (1993), Rutherford (1993) et Whalley & Wigle (1991) (cette énumération n'est pas complète) déterminent le coût brut de la réduction des émissions de dioxyde de carbone, indépendamment des avantages liés au ralentissement du réchauffement global. Ils sont calibrés sur une trajectoire de référence exogène. Ils prévoient les modifications de l'équilibre général, par rapport à ce référent, lorsqu'un quota d'émission exogène vient contraindre l'activité économique. De même que Nordhaus (1977), ils calculent la taxe sur le carbone requise pour respecter le quota et le coût économique de la norme environnementale. Les ajustements décrits résultent de la rationalité des agents économiques, dans une économie de concurrence pure et parfaite. Les spécifications retenues pour la production et l'utilité sont non linéaires. Le cumul de l'évolution démographique, du progrès technologique, de l'épuisement des ressources fossiles et de l'accumulation du capital fonde la dynamique de ces modèles.

Les modèles de planification de Falk & Mendelsohn (1993), Manne & alii (1995), Nordhaus (1992b) et (1993), Peck & Teisberg (1992) et Tahvonen (1994) intègrent, en plus, les avantages de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Outre l'analyse de scénarios, ils offrent donc la possibilité de trouver la trajectoire optimale de la taxe sur les émissions de carbone, selon une démarche rigoureusement identique à celle du modèle théorique de

⁶ - Arbitrairement, Nordhaus (1977) situe cette norme au doublement de la concentration de carbone atmosphérique.

pollution cumulative. La décentralisation de cette politique internalise l'externalité climatique en confrontant les agents économiques au coût véritable de leurs activités. La contrepartie de cette capacité à déterminer la politique optimale du climat est une représentation singulièrement plus dépouillée du système économique et un niveau d'agrégation plus grand.

Arrow (1995) apparaît la lutte contre l'effet de serre à un investissement public de long terme. En faisant, la politique du climat s'envisage aussi sous l'angle des transferts intergénérationnels qu'elle produit et, par voie de conséquence, remet à l'ordre du jour les problèmes récurrents du bien-fondé du principe d'actualisation, de l'équité intergénérationnelle et du développement soutenable. Les prises de position contre le mécanisme d'actualisation sont nombreuses (Partridge, 1981 ; Ramsey, 1928 ; Rawls, 1971 ; Solow, 1974). L'argument des philosophes contre l'actualisation s'énonce schématiquement de la façon suivante : la localisation dans le temps, de même que dans l'espace, ne peut pas constituer, d'un point de vue éthique, un motif de différenciation entre deux individus.

En réponse à ce débat, certains économistes ont recherché des fonctions de bien-être social moralement plus acceptables, selon une optique que l'on peut qualifier de contractuelle. Freeman (1977) et Page (1977) explorent la possibilité de remplacer le critère "utilitariste" avec actualisation par un mécanisme de vote intergénérationnel. Par opposition à l'actualisation, ce critère de décision investit toutes les générations d'un même pouvoir d'expression et de décision : une voix chacune. Ces tentatives échouent dans la mesure où elles ne dégagent pas une règle de choix immuable, applicable en toutes circonstances. Solow (1974) utilise le critère Maxi-Min, inspiré de Rawls (1971), dans un modèle de croissance. Ce programme économique revient, en fait, à garantir un flux de consommation constant le plus grand possible. Solow détermine les conditions de sa faisabilité. L'inconvénient du critère Maxi-Min est qu'il perpétue la pauvreté, si la dotation en capital est faible, mais qu'il n'explique pas la constitution d'un stock initial suffisant pour soutenir un niveau de vie décent à toutes les générations.

La faillite relative des propositions alternatives précédentes expliquent que le critère de décision le plus appliqué reste la maximisation de la somme des flux d'utilité actualisés (nous

l'adopterons également). Le facteur d'actualisation dépend du taux de préférence pure pour le présent et des perspectives de croissance économique (Arrow, 1995 ; Nordhaus, 1992b). Rejetant l'argument du coût d'opportunité des investissements publics, les économistes choisissent un taux d'actualisation compris entre 3 et 5 pour-cent, inférieur au taux de profit de l'investissement privé.

Le concept de développement soutenable est apparu dans les années 80 et étend le débat sur l'équité intergénérationnelle. Parmi la multitude de définitions de ce concept (Pezzey (1989) en dénombre 20), Heyes & Liston-Heyes (1995) retiennent les plus représentatives. Le développement soutenable implique :

- la satisfaction des « besoins du présent sans compromettre la faculté des générations futures à satisfaire les leurs » (WCED, 1987) ;
- la préservation stricte du patrimoine naturel (Daly, 1990 ; Barbier & Markandya, 1990) ;
- l'entretien de la capacité productive de l'environnement (Pearce & alli, 1989) ;
- la non-décroissance de l'utilité d'un membre représentatif de la société (Pezzey, 1992).

La littérature sur le développement soutenable rompt avec la réflexion normative des années 70. La volonté de suivre un développement harmonieux s'exprime désormais directement sous la forme d'une norme environnementale contraignante. La première définition est la plus populaire. De fait, elle est suffisamment évasive pour englober les trois autres. Les trois définitions suivantes reflètent différentes opinions concernant la place du patrimoine naturel dans l'activité économique. Pour Daly, le capital naturel et le capital produit, ainsi que les différentes composantes de l'environnement, sont essentiellement complémentaires. De ce fait, toute destruction nette d'une composante quelconque de ce dernier réduit le bien-être futur et doit être empêchée. Pour l'école de Londres (Pearce & alli), le patrimoine naturel et le capital produit, ainsi que les différentes composantes du capital naturel, sont substituables jusqu'à un certain point. Par contre, l'effondrement potentiel de la capacité d'adaptation de la biosphère, susceptible de survenir en dessous de certains seuils de qualité de l'environnement, justifie, selon eux, d'imposer des normes minimales de sauvegarde (Ciriacy-Wantrup, 1952). La quatrième définition offre la possibilité de compenser les destructions du patrimoine naturel par un investissement accru en capital produit.

Tous ces thèmes de réflexion découlent de la nature dynamique de l'externalité climatique, elle-même liée à la lenteur de l'élimination des gaz à effet de serre atmosphériques. Le regard ainsi porté ne suffit pas et néglige l'autre aspect essentiel du problème, qui est que l'externalité climatique concerne tous les pays du monde sans distinction, tant du point de vue des responsabilités que de celui du partage des conséquences. Le renforcement de l'effet de serre doit donc être rangé dans la catégorie des pollutions transfrontières globales (Mäler, 1990). Dans ce contexte, aucune raison n'autorise à croire que les pays, vu comme des entités de décision souveraines exploitant légitimement l'atmosphère, bien traditionnellement gratuit, accepteront de lutter contre l'effet de serre dans le sens de l'intérêt commun. Il s'ensuit que l'accroissement de l'effet doit être analysé sous la forme d'un jeu dynamique global.

Cette approche a été développée dans la littérature par Cesar (1994), Gottinger (1991), Hoël (1991b), Mäler (1991) et van der Ploeg & de Zeeuw (1992). Elle conduit à définir différentes stratégies d'action et à les comparer entre elles. La stratégie non coopérative consiste à ignorer les effets transfrontières de la pollution. S'ils adoptent ce type de comportement, les pays cessent d'émettre le polluant quand la productivité de la dernière unité émise est compensée par les dommages domestiques futurs. La stratégie coopérative suppose, pour sa part, que les pays acceptent de coordonner leurs actions, en vue de maximiser le bien-être global. Dans ce cas, ils internalisent les dommages mondiaux de l'effet de serre, c'est-à-dire aussi bien ceux qu'ils ressentiront sur leur territoire que ceux qui apparaîtront à l'étranger. Cesar et van der Ploeg & de Zeeuw montrent que le comportement non coopératif conduit à polluer de façon excessive. Ils prouvent également que l'excès de pollution par rapport à la stratégie coopérative augmente si les pays ont la possibilité d'observer instantanément et sans coût l'évolution du degré de pollution de l'environnement.

* * *

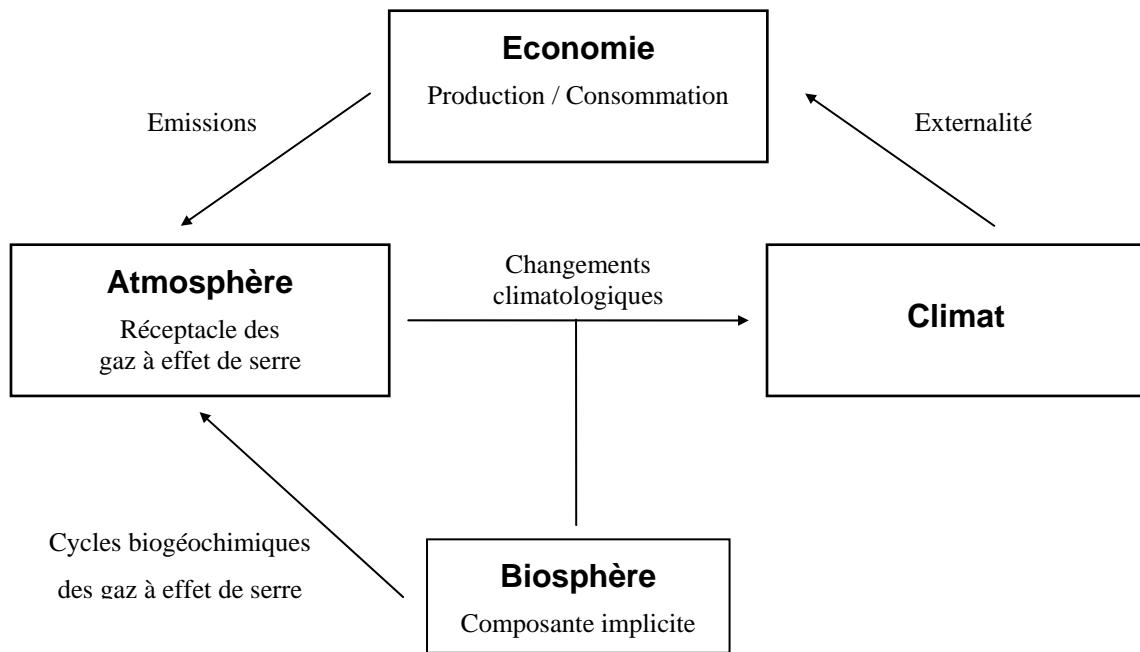
*

Dans cette thèse, notre réflexion repose entièrement sur l'hypothèse selon laquelle toute mesure de lutte contre l'effet de serre devrait être jugée à l'aune d'une analyse coût-bénéfice. Plus précisément, nous considérons que la politique du climat doit maximiser la différence entre les dommages climatiques évités et le coût des politiques à l'origine de ce bienfait. Bien évidemment, il s'agit là d'un parti pris qui, par définition, déplaira à certains. Néanmoins, il se défend très bien d'un point de vue économique. D'ailleurs, sans ce critère, il deviendrait

difficile, sauf cas particuliers, de justifier une mesure de dépollution de l'environnement plutôt qu'une autre.

Pour décrire qualitativement ce mécanisme de décision, nous construirons un modèle économique formalisant les relations entre l'économie et le climat.

Formalisation des relations entre l'économie, l'atmosphère, la biosphère et le climat



L'interaction entre l'économie et le climat articule quatre composantes liées, les unes aux autres, par des relations fonctionnelles. L'économie, au travers des activités de production et de consommation, est reliée à l'environnement par les émissions de gaz à effet de serre et par les nuisances climatiques qu'elle subit en retour.

Les autres éléments du modèle décrivent la chaîne intermédiaire entre les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre et l'externalité climatique. Au commencement, l'atmosphère reçoit les gaz à effet de serre. Ensuite, la biosphère, addition de la végétation et des océans, élimine une partie des gaz accumulés dans l'atmosphère. Ce mécanisme fait que la pollution n'est pas définitive, mais cette réversibilité est très longue à l'échelle humaine. Pour finir, le climat dépend de la composition de l'atmosphère et d'interactions complexes

avec la biosphère. Ces composantes et les relations fonctionnelles qui les unissent seront décrites dans un chapitre préliminaire.

Tandis que les relations précédentes sont objectives, la description, dans le modèle, du fonctionnement de l'économie repose sur une axiomatique qui, bien qu'acceptée par la grande majorité des économistes, doit être énoncée, d'autant plus qu'elle ne sera pas rappelée ultérieurement.

L'individualisme méthodologique constitue le principe fondateur de notre analyse. En vertu de celui-ci, le fonctionnement de l'économie découle des actions des agents économiques, qui sont motivées par des objectifs personnels indépendants et qui sont entreprises en contexte d'isolement décisionnel. Ce point de départ donne une importance primordiale à la description du comportement des acteurs économiques. Il implique également que les bienfaits de la préservation de l'environnement s'apprécient au travers des jugements individuels uniquement.

L'axiome de rationalité substantielle implique que les décisions des agents économiques résultent d'un calcul par lequel ils cherchent à améliorer leur situation. Le critère de décision varie avec la fonction de l'agent économique :

- le producteur maximise son profit ;
- le consommateur maximise son utilité ;
- le gouvernement représente l'intérêt des générations présente et futures de consommateurs.

A chaque instant, il agrège les utilités des consommateurs en une fonction de bien-être collective. Sur une période de planification donnée, il juge des décisions à prendre, dans l'objectif de maximiser la somme des flux d'utilité des générations successives.

Les agents économiques élaborent des anticipations rationnelles sur l'avenir, dans un contexte d'information parfaite. Ces conditions participent à la planification des décisions économiques et, notamment, à l'arbitrage entre la consommation présente et les dommages climatiques futurs, fondement de la politique du climat. Pratiquement, elles impliquent qu'il

est possible de prévoir le bien-être futur, donc d'anticiper les préférences, le progrès technique et les dommages de l'effet de serre (ou leur espérance mathématique).

L'hypothèse de concurrence pure et parfaite est également posée. Elle élimine d'office du champ de l'analyse les monopoles naturels, la présence d'externalités (en-dehors de l'effet de serre additionnel) et les biens publics. Ces conséquences sous-tendent l'analyse des modèles d'équilibre général appliqués du chapitre 2.

Les relations caractéristiques du modèle schématisé plus haut sont l'émission des gaz à effet de serre et le dommage climatique. De ce fait, une formalisation dépouillée du système économique suffit pour proposer une description qualitative de la politique du climat. Notamment, le mécanisme d'accumulation du capital n'intervient que parallèlement à l'interaction principale entre la production et le climat, sans en altérer la mécanique intrinsèque, et peut donc être laissé de côté. Ces arguments, combinés au fait que la simplicité facilite l'étude de cas de figure plus complexes (catastrophes climatiques irréversibles, jeu différentiel de l'effet de serre, incertitude...), justifient la modélisation que nous retiendrons : d'une part, le rejet de polluants sera l'unique intrant de la fonction de production et, d'autre part, l'externalité climatique apparaîtra comme argument de la fonction de production.

Notre modèle est donc amplement suffisant pour une caractérisation qualitative de la gestion du climat. Cependant, il laisse de côté un certain nombre de mécanismes économiques particulièrement intéressants à étudier. Conscients de cela, nous avons jugé bon, tout au long de notre thèse, d'élargir la portée de nos discussions en analysant et en exploitant systématiquement la littérature sur l'évaluation des politiques climatiques.

* * *

*

Le modèle que nous venons de décrire brièvement sera exploité dans trois directions différentes, qui définissent notre apport à la réflexion sur la relation entre le renforcement de l'effet de serre et l'économie.

En premier lieu, nous avons pensé qu'il était nécessaire d'unifier la littérature économique sur l'effet de serre, dans l'idée de proposer une analyse économique de l'effet de serre. Ce dessein est ambitieux et, de toute évidence, nous n'y parviendrons que de façon incomplète, tant la littérature est vaste et diverse. Malgré cela, nous proposerons un outil de réflexion cohérent, regroupant les contributions les plus importantes de la littérature sur le sujet. Notre modèle de pollution cumulative sera le moteur de cette présentation. Enrichi au fur et à mesure des sujets abordés, il servira à identifier les éléments importants de la politique du climat et indiquera comment les articuler entre eux.

Cette “visite guidée” de la littérature économique sera complétée par deux réflexions personnelles.

Tout d'abord, nous avons constaté que la réflexion économique évincé presque complètement la question des catastrophes climatiques irréversibles⁷. Ce parti pris est curieux, surtout si on le met en parallèle avec les inquiétudes de la communauté scientifique, qui situe potentiellement le principal danger de l'effet de serre dans ces événements. Ce paradoxe justifie, à notre avis, de consacrer une partie non négligeable de notre thèse à ces questions.

Ensuite, nous prolongeons la littérature économique par une étude des négociations internationales sur le climat, dans une optique qui se veut à la fois positive et normative. Dans un premier temps, partant d'un bilan détaillé de la situation, nous isolons les sources de blocage des discussions, pour ensuite illustrer l'enjeu des débats menés. Dans un second temps, nous proposons une lecture plus théorique du sujet, inspirée par la théorie des coalitions, pour tenter de comprendre la forme actuelle de la Convention-cadre sur les changements climatiques et les engagements de chacun.

* * *

*

⁷ - Nous avons réuni seulement quatre références sur ce sujet. La vision qui ressort de leur analyse est incomplète, voire parfois erronée.

La première partie de notre essai définit et caractérise la politique mondiale du climat. Le chapitre 1 présente le modèle de pollution cumulative. Son exploitation conduit à une description qualitative de la politique optimale du climat. Les deux chapitres suivants se conçoivent comme un prolongement empirique du premier chapitre, selon une séquence coût / avantage / politique optimale.

Le chapitre 2 synthétise les méthodes et les résultats des modèles d'équilibre général appliqués conçus pour évaluer les coûts de la réduction des émissions de carbone. Nous mettons l'accent sur l'interprétation des résultats, en nous dotant d'outils d'analyse simples. Malheureusement (du point de vue de notre problématique), les estimations des modèles d'équilibre général appliqués se désintéressent de l'aspect bénéfique des mesures de lutte contre l'effet de serre. Par contre, leurs évaluations, reprises sous la forme d'une fonction de coût de dépollution exogène, servent dans les modèles de planification étudiés dans le chapitre 3.

Le chapitre 3 montre les deux étapes du calibrage d'une fonction de dommage climatique : l'évaluation du coût économique du doublement de la concentration de carbone et le choix d'une spécification ad hoc. Cette information et les fonctions de coût de dépollution, ajustées sur les modèles d'équilibre général, sont associées par certains économistes pour construire des modèles de contrôle optimal appliqués ; elles permettent ensuite d'évaluer la politique optimale du climat. Nous conclurons la première partie de la thèse en présentant ces résultats et en commentant les “prescriptions” qui en découlent.

La seconde partie remet partiellement en question l'approche précédente, qui peut être vue comme représentative de l'opinion moyenne des économistes sur la meilleure réaction internationale contre l'effet de serre. Nous y étudions dans le détail l'élaboration d'une politique optimale du climat en face d'une catastrophe climatique irréversible. Dans le chapitre 4, nous faisons l'hypothèse que la catastrophe est parfaitement anticipée, aussi bien du point de vue de ses conséquences que de celui des conditions de son apparition. Nous comparons deux stratégies d'action concurrentes, l'une consistant à refuser la catastrophe en

limitant l'émission du polluant de façon appropriée, l'autre consistant à choisir le moment optimum pour la subir.

Dans le chapitre 5, nous rejetons l'hypothèse d'une connaissance parfaite des caractéristiques de la catastrophe. Pour commencer, nous imaginons que l'incidence d'une catastrophe est incertaine, mais que sa connaissance s'améliore avec le temps. Ce cas de figure nous amène à définir une stratégie d'action consistant à attendre les éclaircissements scientifiques avant de décider si l'on doit, ou non, provoquer cet événement. Nous nous interrogeons sur la rationalité sous-jacente d'un tel comportement. Après cela, nous analysons la situation où l'échéance de la catastrophe est incertaine.

Nous consacrons la troisième partie de notre thèse à la faisabilité de la politique mondiale de l'effet de serre. Le chapitre 6 récrit le modèle de pollution cumulative sous la forme d'un jeu différentiel de l'effet de serre. Contrairement à la première partie de la thèse, où les pays sont supposés adhérer automatiquement à la politique du climat, cette décision leur revient désormais de droit. Ceci conduit à définir et à comparer les stratégies non coopérative de Nash et coopérative. De même que dans la première partie de la thèse, ces discussions sont prolongées en utilisant les estimations de la littérature économique. Ce chapitre s'achève par une réflexion théorique sur les chances d'apparition d'un comportement coopératif.

Le chapitre 7 envisage la question des négociations internationales sur le climat d'une manière plus positive. Après une description détaillée des engagements souscrits par les signataires de la Convention-cadre sur les changements climatiques et de ses prolongements potentiels, nous illustrons l'enjeu des débats actuels, au moyen d'une application numérique calibrée sur les résultats des chapitres 2, 3 et 6. Divers aménagements de la Convention, actuellement en pourparlers, sont étudiés : permis de polluer négociables et application conjointe.

Dans le chapitre 8, nous quittons cette discussion pour nous intéresser à la formation de coalitions de pays. Cette optique est très caractéristique, à notre avis, de l'équilibre actuel des

négociations, que l'on pourrait qualifier de bipartite. Grâce à un algorithme de résolution simulé sur informatique, nous dépassons les configurations habituellement étudiées par la littérature économique, qui considèrent soit une multitude de pays identiques, soit deux à trois pays différents. Nous identifions le profil type d'un pays signataire d'une coalition auto-réalisatrice ("self-enforced" en anglais), dans l'hypothèse où les gains de l'entente ne sont pas redistribués entre les participants et où l'entrée dans l'accord est libre. Nous abandonnons ensuite cette hypothèse au profit d'une redistribution assise sur le "pouvoir" de Shapley des membres, c'est-à-dire proportionnelle à ce qu'apporte chaque pays membre.

Chapitre préliminaire

L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène méconnu. Pour preuve, il est souvent amalgamé avec une autre menace environnementale majeure, la raréfaction de l'ozone troposphérique. Dans ce climat d'incompréhension, l'attitude commune face aux mises en garde contre les risques de bouleversements climatiques est soit incrédule, soit ironique, quand ce débat est perçu comme un avatar des litanies populaires du type : « Ah ! Il n'y a plus de saisons ! » La présentation scientifique qui va suivre devrait clarifier certaines choses ; mais là n'est pas son utilité première, comme nous l'exposons ci-dessous.

Une analyse économique de l'effet de serre passe nécessairement par une bonne connaissance des mécanismes climatiques. En effet, une représentation trop simpliste des ces phénomènes n'offrirait pas une base de réflexion correcte. D'ailleurs, les modèles économiques récents ne sauraient être compris sans ce détour. Une des questions importantes concerne, par exemple, le devenir des molécules de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; d'un point de vue climatique comme économique, la situation change radicalement entre le cas où ces molécules sont persistantes et celui où elles sont recyclées par un mécanisme quelconque.

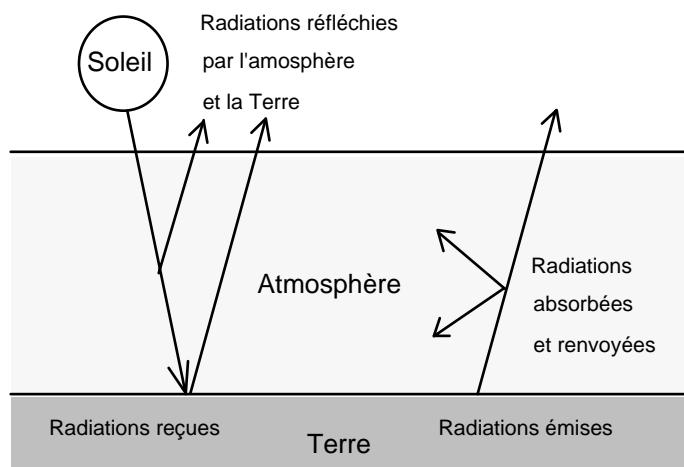
L'objet de ce chapitre préliminaire est donc de nous familiariser avec le corpus théorique de la climatologie. Dans une première section, nous définirons l'effet de serre, en insistant sur le caractère naturel de ce phénomène. Nous montrerons ensuite que l'activité économique le renforce, en provoquant une accumulation notable de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nous verrons que les prévisions des modèles climatiques tablent sur un réchauffement planétaire non négligeable pour le siècle à venir, conséquence des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre. Dans une troisième section, nous concentrerons notre attention sur les particularités de chaque gaz à effet de serre : Quelles en sont les sources ? Comment s'accumulent-ils dans l'atmosphère ? A quel rythme en sont-ils éliminés ? A quantités égales, certains gaz sont-ils plus néfastes pour le climat que d'autres ? Si oui,

quelles implications pratiques cela a-t-il sur le traitement particulier que l'on doit leur réservier ? Pour terminer cette présentation, nous examinerons plus dans le détail les conséquences futures du réchauffement prévu, en distinguant les dommages graduels des risques de catastrophes majeures.

1 - L'effet de serre naturel

Schématiquement, la température de la Terre dépend de sa capacité à piéger les rayonnements infrarouges d'origine solaire. Si l'atmosphère était parfaitement transparente aux flux infrarouges, la Terre réfléchirait la totalité de la chaleur reçue. La température moyenne des basses couches atmosphériques avoisinerait alors -18 degrés Celsius et la Vie n'aurait pas pu apparaître. Heureusement, l'atmosphère est partiellement opaque aux infrarouges. Une partie de la chaleur captée est absorbée et la température moyenne à la surface de la Terre s'élève de 33 degrés Celsius au-dessus de la valeur précédente, pour atteindre 15 degrés Celsius.

Schéma 1 : Mécanisme de l'effet de serre



Source : Cesar (1994)

Définition 1 : « On entend par “gaz à effet de serre” les constituants gazeux de l’atmosphère, tant naturels qu’anthropiques, qui absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge. »

Source : Article premier, définition 1, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (15 mai 1992).

Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde d'azote et les chlorofluorocarbures, qui sont des gaz artificiels. Avant la révolution industrielle, leur concentration atmosphérique était stable et l'effet de serre était équilibré à son niveau naturel.

Définition 2 : « Le mécanisme par lequel les gaz à effet de serre réchauffent le climat est appelé “effet de serre”. »

Source : Thuillier (1992).

2 - L'effet de serre additionnel

Depuis la révolution industrielle, la teneur atmosphérique de tous les gaz à effet de serre a augmenté sensiblement : de 25 pour-cent pour le gaz carbonique ; d'un facteur 2 pour le méthane ; de 9 pour-cent pour l'oxyde d'azote. Les chlorofluorocarbures étant des gaz à effet de serre artificiels, leur concentration atmosphérique était nulle avant l'ère industrielle.

La responsabilité des sociétés industrialisées dans cette tendance de long terme ne fait aucun doute. Les sources d'émissions anthropogéniques sont clairement identifiées : le dioxyde de carbone provient de la combustion massive des énergies fossiles et de la déforestation (le carbone contenu dans l'humus du sol se dégage par combustion après la disparition de la couverture forestière) ; le méthane provient de l'agriculture (principalement, l'élevage de ruminants et la culture en rizières) et de l'exploitation du gaz naturel ; l'oxyde d'azote résulte de la combustion des végétaux et de l'utilisation des engrains azotés.

L'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère renforce l'effet de serre. En vertu des mécanismes présentés dans la section 1, le réchauffement climatique est certain, toutes

choses égales par ailleurs. Cependant, son amplitude n'est pas facilement prévisible, du fait d'un nombre élevé de rétroactions positives et négatives, que nous présenterons plus loin¹.

Définition 3 : « On entend par “changements climatiques” des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. ».

Source : Article premier, définition 2, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (15 mai 1992).

L'élévation de la température d'équilibre ΔT par rapport à sa valeur préindustrielle dépend de l'accroissement du forçage radiatif F de l'atmosphère, qui mesure la quantité d'énergie piégée par l'atmosphère en watts par mètre carré. Le forçage radiatif augmente avec la teneur atmosphérique de gaz à effet de serre. Le réchauffement d'équilibre se calcule en multipliant le forçage radiatif par deux constantes climatologiques. La première convertit directement le forçage radiatif supplémentaire en réchauffement, sans tenir compte des éventuelles rétroactions. Elle est égale à 0,3 degré par watt au mètre carré. La seconde vient corriger la première évaluation des rétroactions positives et négatives. Sa valeur se déduit des simulations opérées à l'aide de modèles de circulation générale et est comprise entre 1,1 et 3,4 (sans unité), 1,9 étant sa réalisation la plus probable. On en vient donc à écrire la relation suivante : $\Delta T = A \cdot B \cdot F$ avec $A = 0,3^\circ C / W \cdot m^{-2}$ et $B = 1,9$. Dans les chapitres ultérieurs, nous écrirons $\omega = A \cdot B$ pour simplifier les notations.

La méconnaissance des rétroactions et de leur amplitude explique l'essentiel des incertitudes sur le réchauffement planétaire futur. La principale source d'erreur provient du rôle des nuages. Le réchauffement planétaire s'accompagnera normalement d'une augmentation de l'évaporation. Puisque la vapeur d'eau est aussi un gaz à effet de serre, ceci produira une rétroaction positive. Mais, cette dernière sera compensée presque totalement si la vapeur d'eau supplémentaire forme des nuages d'altitude (alors, $B = 1,1$), alors qu'elle sera amplifiée si elle se traduit par la formation de nuages bas (alors, $B = 3,4$). Des tests de sensibilité,

¹ - Les rétroactions rassemblent toutes les modifications secondaires du système climatique accompagnant le réchauffement planétaire. Elles sont positives lorsqu'elles amplifient le réchauffement, négatives sinon.

menés sur 18 modèles de circulation générale, ont montré que l'essentiel des divergences entre les simulations provenait de ce problème (Le Treut & Kandel, 1992).

3 - Les cycles biogéochimiques des gaz à effet de serre

Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques modifient l'atmosphère terrestre. Les mesures directes faites depuis une trentaine d'années et les mesures indirectes permettant de remonter plus loin dans le temps attestent largement ce fait. Dans le même temps, ces observations ont montré que l'atmosphère éliminait partiellement les gaz à effet de serre reçus. Les scientifiques se sont donc penchés sur les mécanismes régissant ces recyclages. De fait, la connaissance de ces phénomènes est essentielle pour comprendre le rôle des émissions présentes sur la composition de l'atmosphère et sur le climat futurs.

Définition 4 : « On entend par “réservoir” un ou plusieurs constituants du système climatique qui retiennent un gaz à effet de serre ou un précurseur de gaz à effet de serre ».

Source : Article premier, définition 7, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (15 mai 1992).

Définition 5 : « On entend par “puits” tout processus, toute activité ou tout mécanisme, naturel ou artificiel, qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ».

Source : Article premier, définition 8, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (15 mai 1992).

Le cycle du carbone définit la relation entre les trois réservoirs de carbone que sont l'atmosphère, la biosphère terrestre et les océans. L'atmosphère échange annuellement 90 GtC² avec les océans et 113 GtC avec la biosphère continentale. Sans l'intervention humaine, ces flux incessants s'équilibrent et le stock de carbone atmosphérique reste stable.

Comparativement, les émissions de carbone d'origine humaine sont modestes : en 1990, 5,4 GtC par combustion des énergies fossiles et 1,6 GtC (± 1 GtC) du fait de la déforestation (Cline, 1991). Bien que réduites par rapport aux échanges naturels, ces émissions entraînent une accumulation nette de carbone de 3,4 GtC par an, ce qui correspond à un taux de

² - 1 GtC = 1 milliard de tonnes de carbone = 12/44 milliard de tonnes de dioxyde de carbone.

croissance annuel de la teneur atmosphérique en carbone de 0,5 pour-cent. La quantité manquante est captée par les océans et la végétation.

A l'équilibre, la concentration de carbone dans les océans dépend de la teneur atmosphérique en carbone. Les scientifiques estiment ainsi que les océans finiront, à terme, par dissoudre la majeure partie du carbone atmosphérique excédentaire, au point qu'il n'en restera que 17 pour-cent dans l'atmosphère. Les océans sont donc un puits de carbone. Actuellement, ce mécanisme explique l'élimination de 2 GtC ($\pm 0,8$ GtC) par an sur les 7 GtC émises par l'homme (Minster & Merlivat, 1992).

L'absorption réelle par les océans est donc nettement inférieure aux 83 pour-cent calculés par les scientifiques. La raison est que l'accumulation du carbone dans l'atmosphère se fait à un rythme trop rapide. Les courants marins de surface (Gulf Stream ; Kuroshio ; courant du Labrador ; courant de la mer de Weddel...) captent le carbone atmosphérique jusqu'à en être saturés, puis ils n'en acceptent plus tant qu'ils n'ont pas été régénérés par mélange avec les eaux profondes. Ce cycle de régénération varie, selon les courants marins, de 30 à 1000 ans. Le rythme du mélange des eaux de surface et des eaux profondes agit donc comme un facteur limitatif à l'élimination du carbone atmosphérique par les océans.

La végétation devient également un puits de carbone lorsque la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone augmente. En effet, la présence de ce gaz en plus grande quantité stimule la croissance des plantes, qui se mettent à emmagasiner une partie du carbone excédentaire. Ce phénomène explique à son tour la disparition de 1,1 GtC (Goudriaan, 1992).

A ce stade, il reste 0,5 GtC sur les 7 GtC émises dont on ignore la destination finale. Selon certains scientifiques, le reste pourrait être imputé aux politiques de reboisement menées dans les zones tempérées du monde et, éventuellement, à une surestimation systématique du rythme de dégagement du carbone du sol après la déforestation en zone tropicale (Goudriaan, 1992).

Les modèles économiques formalisent généralement les échanges de carbone entre l'atmosphère et les autres réservoirs de façon schématique : l'absorption par les océans est supposée proportionnelle au stock de carbone atmosphérique ; l'accumulation du carbone par la végétation réduit les émissions anthropogéniques d'une proportion fixée.

$G_{CO_2}(t)$ désignant le stock de carbone atmosphérique et $g_{CO_2}(t)$ les émissions anthropogéniques à la date t , l'accroissement du stock est donné par :

$$G_{CO_2}(t+1) = \alpha \cdot g_{CO_2}(t) + (1 - \beta) \cdot G_{CO_2}(t), \quad (1)$$

où

α est le taux de rétention atmosphérique,

β est le taux de transfert du carbone entre la surface des océans et l'océan profond.

Nordhaus (1992a) et (1993) utilise les valeurs $\alpha = 0,64$ ($\pm 0,15$) et $\beta = 1/120$ (ce paramètre est très variable dans la littérature économique, puisqu'il oscille entre 0,004 et 0,018). Le taux de rétention atmosphérique est obtenu par régression, en se basant sur les émissions et l'accumulation passées du carbone. Le taux de transfert est calculé par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le changement Climatique (G.I.E.C. ; I.P.C.C. en anglais). L'inverse de ce paramètre mesure la durée de résidence du carbone dans l'atmosphère. Selon le G.I.E.C., elle serait comprise entre 50 et 200 ans, 120 ans étant sa valeur la plus probable.

Comme nous le démontrerons dans la section prochaine, le dioxyde de carbone est le principal responsable du renforcement de l'effet de serre. Il est donc légitime qu'il ait plus retenu l'attention des économistes que les autres. Pour les mêmes raisons, nous passerons outre la description des cycles biogéochimiques des autres gaz à effet de serre, de peur que cette énumération devienne ennuyeuse. Par contre, nous présentons les informations essentielles que l'on tirerait d'une telle étude dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	Concentration en 1990 (ppmv)	Concentration en 1750/1800 (ppmv)	Croissance depuis 1750/1800	Durée de vie (années)	Projection (croissance annuelle)
CO2	354	280	26%	120	0,50%
CH4	1,717	0,8	115%	10	0,90%
N2O	0,3097	0,288	8%	150	0,25%
HCFC-22	0,0001	nulle	..	15	..
CFC-11	0,00028	nulle	..	65	4,00%
CFC-12	0,000484	nulle	..	130	4,00%
CFC-113	0,00005	nulle	..	70	..

Note : ppmv signifie Parties Par Million en Volume.

Source : Houghton et alii (1990).

Le tableau 1 résume l'ensemble des informations rassemblées jusqu'à présent et en apporte de nouvelles. La durée de vie des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est très variable mais généralement longue. Les émissions anthropogéniques présentes auront donc des conséquences durables sur le climat. Comme nous le verrons dans la section prochaine, la durée de vie des gaz à effet de serre influence énormément l'importance de leur contribution au réchauffement global.

Les taux de croissance actuels donnés dans le tableau 1 sont évidemment à utiliser avec précaution. Ils prolongent des tendances observées sur les dernières années mais ne se réaliseront pas si la communauté internationale s'entend sur une politique de lutte contre l'effet de serre. Même si les nations ne parvenaient pas à un tel accord, la ratification quasi unanime du protocole de Montréal, acquise en 1990, dont l'objet est de protéger la couche d'ozone, devrait avoir pour conséquence une réduction très importante des émissions de chlorofluorocarbures, qui n'est pas prise en compte dans le tableau.

4 - Contributions individuelles aux changements climatiques

La capacité à retenir les rayonnements infrarouges diffère d'un gaz à l'autre. Par exemple, l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone déstabilise moins le climat que l'émission de la même masse de chlorofluorocabures.

La comparaison des gaz à effet de serre sur des critères scientifiques simplifie la modélisation économique, soit en aidant à éliminer les gaz les moins importants, soit en construisant une grille de conversion permettant d'exprimer tous les gaz dans la même unité, généralement l'équivalent dioxyde de carbone.

La décomposition du forçage radiatif global isole, à un instant donné, la contribution individuelle de chaque gaz à effet de serre au réchauffement global (Peck & Teisberg, 1992) :

$$F = F_{CO_2} + F_{CH_4} + F_{N_2O} + F_{CFC}, \quad (2)$$

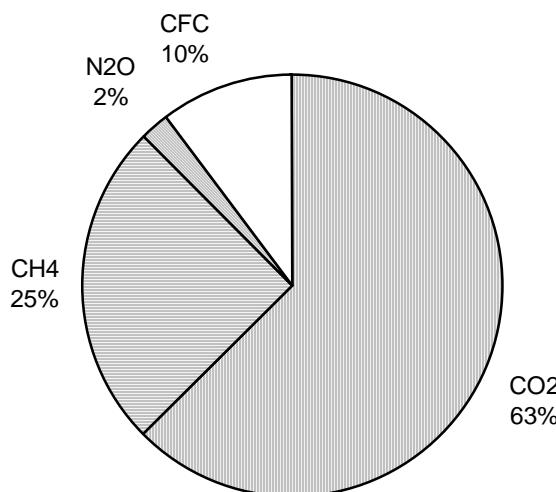
où

$$F_{CO_2} = 6,33 \cdot \ln(G_{CO_2}) - 35,65, \quad F_{CH_4} = 1,42 \cdot \sqrt{G_{CH_4}} - 1,27,$$

$$F_{N_2O} = 2,76 \cdot \sqrt{G_{N_2O}} - 1,48, \quad F_{CFC} = 263,16 \cdot G_{CFC},$$

G_i désignant la concentration atmosphérique en gaz i (en ppmv).

Graphique 1 : Contributions individuelles au forçage radiatif (1990)



Le graphique 1 est obtenu en utilisant la relation (2) et les concentrations atmosphériques du tableau 1. D'après ces calculs, le forçage radiatif, en 1990, est supérieur de 2,4 watts par mètre carré à sa valeur naturelle d'avant la révolution industrielle. Le dioxyde de carbone contribue pour 63 pour-cent à cette augmentation, contre 25 pour-cent pour le méthane, 10 pour-cent pour les chlorofluorocarbures et 2 pour-cent pour l'oxyde d'azote.

Ces résultats ont peu d'intérêt pour le décideur. Ils indiquent seulement que, en l'état actuel des choses, compte tenu des émissions anthropogéniques des différents gaz à effet de serre depuis deux siècles et des concentrations atmosphériques afférentes, tel gaz est responsable d'une proportion donnée du réchauffement courant.

Une information plus utile serait de savoir comment les émissions d'aujourd'hui agissent sur le climat. Elle s'obtient en calculant l'accroissement du forçage radiatif global imputable à l'émission d'une unité de masse de chaque gaz à effet de serre, i.e. par la dérivée des relations (2). Ce critère de comparaison a donné lieu au calcul du forçage radiatif relatif instantané (G.I.E.C.), qui rapporte l'accroissement du forçage radiatif des différents gaz à celui du gaz carbonique : voir le tableau 2.

La comparaison ainsi obtenue n'est pas pleinement satisfaisante car elle néglige la durée de vie des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour comprendre cela, supposons qu'en doublant la concentration de deux gaz à effet de serre, on double l'intensité radiative instantanée du premier et on quadruple celle de l'autre. La comparaison de cette première donnée impute principalement le réchauffement au second. Mais, si la durée de vie du premier est le double de l'autre, le réchauffement qu'il produit, quoique deux fois moindre, se prolonge sur une période deux fois plus longue. Ainsi, la comparaison des forçages radiatifs instantanés est trompeuse. En réponse, le G.I.E.C. propose un indicateur plus satisfaisant, appelé potentiel de réchauffement global, qui tient compte également de la durée de résidence des gaz dans l'atmosphère : voir le tableau 2. Il comptabilise les effets climatiques futurs des émissions de chaque gaz à effet de serre par rapport au dioxyde de carbone.

Tableau 2 : Comparaison des gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	Forçage radiatif relatif instantané	Potentiel de réchauffement global
CO ₂	1	1
CH ₄	58	9
N ₂ O	206	190
HCFC-22	5440	510
CFC-11	3970	1500
CFC-12	5750	4500
CFC-113	3710	2100

Source : Houghton & alli (1990).

Le potentiel de réchauffement global prouve que les émissions supplémentaires de dioxyde de carbone sont plutôt moins dommageables que les émissions des autres gaz. A l'opposé, les chlorofluorocarbures sont présentés comme les gaz les plus redoutables : comme l'indique leur forçage radiatif relatif instantané, l'accumulation atmosphérique supplémentaire de ces gaz renforce sensiblement l'effet de serre immédiat ; de plus, cet effet se prolonge longtemps après l'émission (voir le tableau 1), si bien que leur potentiel de réchauffement globaux est élevé.

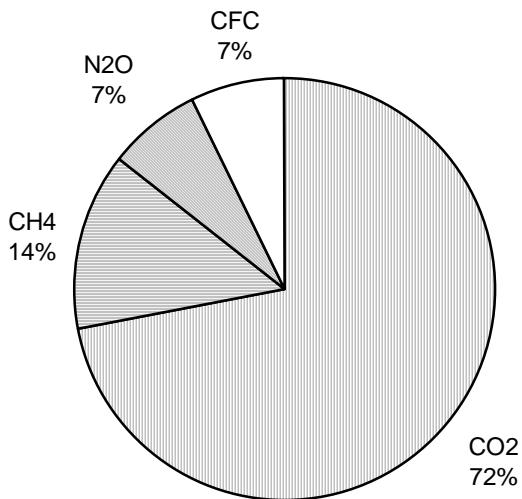
Le potentiel de réchauffement global désigne clairement les sources de gaz à effet de serre qui devront être visées prioritairement par la politique du climat. Le critère de comparaison obtenu est très précieux pour les négociations internationales sur le climat. Toutefois, comme nous le verrons dans le chapitre 3, il n'est pas pleinement satisfaisant d'un point de vue économique.

Définition 6 : « On entend par “source” tout processus ou activité qui libère dans l’atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre. »

Source : Article premier, définition 8, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (15 mai 1992).

Les économistes se sont surtout préoccupés du dioxyde de carbone, tandis que les autres gaz ont nettement moins retenu leur attention. Mis en relation avec les résultats précédents, cela pourrait sembler paradoxal. En fait, les gaz qui affichent le plus grand potentiel de réchauffement sont émis en quantités très faibles, si bien que la réduction de leurs émissions n'aurait qu'un effet limité sur l'évolution climatique future. Pour mieux se rendre compte de cela, nous proposons une mesure des gisements de limitation de l'effet de serre en 1990, que

nous répartissons entre les gaz à effet de serre : voir le graphique 2. Cet indicateur s'obtient simplement en multipliant le potentiel de réchauffement global d'un gaz par les quantités émises de ce gaz : le potentiel de réchauffement mesure le réchauffement intertemporel évité si l'on réduit l'émission d'une unité ; en première approximation, le produit de cette valeur par les émissions totales donne la réduction globale de l'effet de serre si l'on s'abstient d'émettre le gaz.

Graphique 2 : Répartition des gisements de limitation de l'effet de serre (1990)

Cet indicateur avalise bien le choix des économistes. Le ralentissement de l'effet de serre passera avant tout par la limitation des émissions de dioxyde de carbone. La réduction des émissions des autres gaz à effet de serre, quoique que conseillée en tant que mesure d'accompagnement, n'agira que de manière limitée sur le climat.

5 - Résultats des modèles de circulation générale

Les modèles de circulation générale permettent de simuler les conséquences climatiques du renforcement de l'effet de serre. Nous avons déjà présenté un résultat déduit de tels calculs dans la section 2 (voir le paramètre B de la relation de réchauffement).

L'évolution future de la concentration des gaz à effet de serre étant inconnue, la plupart des simulations réalisées utilisent l'hypothèse du doublement de la concentration d'équivalent dioxyde de carbone. Ce scénario correspond à un accroissement du forçage radiatif de 4,4 watts par mètre carré. Les modèles partent de ce choc exogène pour rechercher un nouvel équilibre climatique. Les prévisions de réchauffement obtenues varient entre 1,5 et 4,5 degrés Celsius, la valeur la plus probable étant 2,5 degrés Celsius, que l'on vérifie en utilisant la relation de la section 2 : $0,3 \times 1,9 \times 4,4$.

Les différents modèles prédisent tous que : le réchauffement serait plus important aux latitudes élevées qu'à l'équateur ; les précipitations et l'évaporation devraient croître de 3 à 15 pour-cent. Aucun consensus n'émerge réellement quant à la répartition géographique des précipitations (ce qui est très problématique pour l'évaluation des dommages sur l'agriculture et les écosystèmes) : les pluies sont généralement plus fortes toute l'année aux hautes latitudes et en hiver seulement aux latitudes moyennes ; le signe de leur changement reste incertain aux basses latitudes.

D'autres expériences numériques ont été menées pour étudier la dynamique transitoire des changements climatiques. Elles utilisent quatre scénarios, proposés par le G.E.I.C., pour l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre. Le premier scénario n'envisage aucune mesure de lutte contre l'effet de serre, en dehors des actions déjà entreprises pour limiter les chlorofluorocarbures. Le forçage radiatif de 4,4 watts par mètre carré, correspondant au doublement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, serait alors atteint en 2020. Les trois autres planifient des mesures de plus en plus dures ; avec la projection basse, le forçage de 4,4 watts par mètre carré surviendrait en 2100 seulement.

L'élément nouveau, par rapport aux études statiques, est la mise en évidence d'une inertie du climat due aux océans. Ce résultat explique qu'aucun réchauffement sensible n'ait été perçu à ce jour, alors que le forçage radiatif actuel, d'environ 2,4 watts par mètre carré au-dessus de son niveau naturel (voir la section 4), devrait se traduire par un accroissement de la température d'équilibre de 1,3 degrés Celsius³.

Les modèles économiques formalisent le délai de réchauffement de la façon suivante :

$$\Delta T(t+1) = \Delta T(t) + r \cdot [\omega \cdot F(t) - \Delta T(t)], \quad (3)$$

où

$\Delta T(t)$ est le réchauffement avéré,

$\omega \cdot F(t)$ est la température d'équilibre pour le forçage radiatif courant,

r dépend de l'inertie climatique des océans.

Nordhaus (1992a) et (1993), Manne & alli (1995) utilisent la valeur $r = 1/20$ (ce paramètre est controversé : il varie entre 0,02 et 0,05 dans les modèles économiques). Le délai d'ajustement retenu est de 20 ans et correspond au temps mis pour atteindre $1 - 1/e$ pour-cent de la température d'équilibre, i.e. 63 pour-cent.

6 - Effets du réchauffement sur la planète

Nous distinguons deux types de dommages, ceux qui apparaissent de manière graduelle et ceux qui surviennent brutalement.

6.1 - Des nuisances graduelles

Le premier risque auquel on pense concerne l'équilibre alimentaire du monde. Les effets sur l'agriculture dépendront sensiblement de l'amplitude des variations climatiques. Le réchauffement global risque d'atteindre ce secteur sur plusieurs fronts simultanément : la température elle-même ; l'augmentation des précipitations (comprise entre 3 et 15 %) et de l'évaporation (approximativement les mêmes taux), qui se compense au niveau global, mais dont le solde variera sensiblement selon les régions ; l'humidité du sol ; les vertus fertilisantes du carbone, qui sont asymptotiques et croissent faiblement au-delà du doublement de la concentration en carbone... C'est le résultat de tous ces effets qui déterminera l'impact sur ce secteur d'activité.

L'effet net attendu est globalement négatif, même si l'on intègre les adaptations prévisibles des systèmes de production. Kane, Reilly & Tobey (1992) estiment l'évolution des productions agricoles pour le cas d'un doublement du dioxyde de carbone. Selon leurs calculs, les récoltes diminueraient de 20 pour-cent aux Etats-Unis et dans la Communauté européenne, et de 18 pour-cent au Canada. L'accroissement de la production dans d'autres régions du monde compenserait partiellement ces pertes : 15 pour-cent en Europe septentrionale et en

³ - Les observations actuelles font état d'un réchauffement de 0,5 degré Celsius depuis un siècle.

Australie, 10 pour-cent en Ex-U.R.S.S. et 4 pour-cent au Japon. A plus long terme, soit pour une hausse de la température moyenne de 10 degrés Celsius, les conséquences seraient beaucoup plus graves (Cline, 1994).

A en croire la place que lui ont réservée les médias, l'élévation du niveau des océans préoccupe particulièrement les gens. Le réchauffement lié à un doublement de la concentration d'équivalent carbone produirait une élévation du niveau des océans de 0,66 mètre entre 1990 et 2100. Cette donnée s'apprécie mieux en lui associant l'information selon laquelle une hausse de 1 mètre immergerait 3 % des terres. Pour des températures plus importantes, l'Antarctique commencerait à fondre et l'élévation du niveau des mers serait beaucoup plus conséquente. Cline (1991) estime qu'un accroissement de la température de 10 degrés Celsius l'augmenterait d'au moins 4 mètres.

A côté des deux conséquences précédentes, des effets très variés sont attendus. Les ouragans tropicaux seraient beaucoup plus fréquents (ils apparaissent dans les zones où la température des océans dépasse 27 degrés Celsius, qui seraient beaucoup plus étendues) et gagneraient 40 à 50 % de puissance, dans l'hypothèse du doublement de la concentration. Certains envisagent également des conséquences sur la santé : mortalité estivale des suites d'une canicule plus importante et apparition de maladies tropicales sous nos latitudes tempérées. Des problèmes d'approvisionnement en eau pourraient se poser et, en tout cas, sa raréfaction rendrait les problèmes de pollution de l'eau plus sensibles...

6.2 - Des effets catastrophiques

La communauté scientifique estime que certaines conséquences des bouleversements climatiques peuvent apparaître subitement, parce que la biosphère et les écosystèmes sont souvent en équilibre instable. Jouzel, membre du G.I.E.C., affirme que « le “calme” apparent du climat cache des capacités à basculer rapidement ... dans des régimes très différents. » (Entretien à Libération, 8 aout 1997, p. 7).

A l'échelle des continents et des océans, les simulations les plus récentes prédisent des emballements climatiques dramatiques. Selon l'un de ces scénarios, le Gulf Stream serait dévié de sa trajectoire et stoppé à Gibraltar, à un horizon de 50 à 100 ans. Cette modification aurait des conséquences rapides et sensibles sur le climat de l'Europe occidentale, avec une chute brutale des températures de l'ordre de 4 degrés Celsius.

Il est également possible que les modèles de circulation générale omettent de prendre en compte certaines rétroactions positives. L'histoire de la planète montre que les écosystèmes s'adaptent à des variations de température comparables à celle qui se prépare, mais qui s'étalent sur plusieurs siècles. A contrario, sachant la rapidité probable du réchauffement prévu, leur faculté d'adaptation risque d'être insuffisante. Par exemple, le doublement de la concentration d'équivalent carbone déplacerait la ceinture sud des forêts de 600 à 700 kilomètres vers le nord, en moins d'un siècle, alors qu'une forêt migre au mieux de 100 kilomètres sur la période considérée. Outre les dommages directs que cela impliquerait (pertes écologiques importantes : diversité biologique et désertification), une destruction massive des forêts produirait une rétroaction positive. En effet, les forêts agissent comme des réservoirs de carbone et leur disparition accélérerait l'accumulation du carbone dans l'atmosphère.

D'autres rétroactions positives pourraient aggraver très sérieusement l'effet de serre. La fonte des glaces diminuerait l'albédo moyen de la Terre et augmenterait le réchauffement. Un dégagement massif du méthane emprisonné dans les plateaux continentaux accélérerait le réchauffement...

7 - Conclusion

Les activités économiques de production et de consommation rejettent des gaz à effet de serre en quantités importantes et renforcent le phénomène naturel d'effet de serre. Ceci devrait produire, à terme, un réchauffement général de la planète, de l'ordre de 2,5 degrés Celsius en 2050, selon les prévisions moyennes. Un tel phénomène aurait évidemment des conséquences sur l'environnement et sur l'économie : agriculture, élévation du niveau des

mers, santé, destruction d'écosystèmes et perte de diversité biologique, effets catastrophiques...

Le dioxyde de carbone, qui est un sous-produit de la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), contribuerait pour une bonne part au réchauffement global (72 pour-cent selon nos calculs). Quoique l'aptitude des autres gaz à effet de serre à réchauffer la planète soit généralement plus forte (voir les forçages radiatifs instantanés) et plus durable (voir les durées de vie atmosphériques) que celle du dioxyde de carbone, ils restent émis en quantités suffisamment faibles pour ne pas peser trop durement sur le climat futur. Ceci explique que le gaz carbonique soit la cible principale des politiques de lutte contre l'effet de serre.

A plusieurs reprises, nous aurons l'occasion d'utiliser les relations (1), (2) et (3) de ce chapitre dans les discussions à venir. Pour simplifier, nous recourrons souvent à la linéarisation des forçages radiatifs (cette hypothèse est souvent faite dans la littérature : Tahvonen, 1994 ; Farzin & Tahvonen, 1996). Les informations à retenir pour la suite sont reprises dans l'encadré ci-dessous.

Encadré 1 : Modèle climatique de base

Nous considérons différents gaz à effet de serre, indicés par $i = 1, \dots, N$:

- G_i désigne la concentration atmosphérique du gaz i ;
- g_i est le flux d'émission d'origine anthropogénique du gaz i ;
- F_i mesure le forçage radiatif instantané du gaz i ;
- ΔT est l'élévation de la température par rapport à son niveau naturel.

Le modèle climatique de base s'écrit :

$$\begin{aligned} G_i(t+1) &= \alpha_i \cdot g_i(t) + (1 - \beta_i) \cdot G_i(t) ; \\ F_i(t) &= f_i \cdot (G_i(t) - G_{0,i}) ; \\ \Delta T(t+1) &= (1 - r) \cdot \Delta T(t) + r \cdot \omega \cdot \sum F_i(t) . \end{aligned}$$

Les paramètres utilisés sont :

- pour le gaz carbonique : $\alpha_{CO_2} = 0,64$; $\beta_{CO_2} = 1/120$; $f_{CO_2} = 1,79 \cdot 10^{-2}$; $G_{0,CO_2} = 280$ ppmv.

- pour le méthane : $\alpha_{CH_4} = 1$; $\beta_{CH_4} = 1/10$; $f_{CH_4} = 1,08$; $G_{0,CH_4} = 0,8$ ppmv.
- pour l'oxyde d'azote : $\alpha_{N_2O} = 1$; $\beta = 1/150$; $f_{N_2O} = 4,96$; $G_{0,N_2O} = 0,288$ ppmv.
- pour les CFC : $\alpha_{CFC} = 1$; β_{CFC} (voir le tableau 1) ; $f_{CFC} = 263,16$; $G_{0,CFC} = 0$ ppmv.

Partie I

Politique mondiale du climat

Chapitre 1

Pollution cumulative

Il existe un lien de parenté évident entre le problème posé aujourd'hui par les pollutions cumulatives (Plourde, 1972 ; Forster, 1973), dont l'effet de serre est un exemple, et les questions plus anciennes, inspirées par les ressources épuisables (Hotelling, 1931) et les ressources renouvelables (Gordon, 1954). Entre ces trois types de questions, la différence principale provient de la dynamique du stock considéré, plus précisément de la présence ou de l'absence d'un mécanisme assurant sa régénération. Ensuite, à quelques détails techniques près, tous ces sujets s'articulent autour de la même problématique, à savoir le constat que la consommation présente réduit le bien-être futur (dans le cas des ressources renouvelables et des pollutions cumulatives, on doit dire “trop de consommation...”, du fait de leur caractère renouvelable).

On peut toutefois trouver une différence importante entre les pollutions cumulatives et les autres thèmes. Dans le cas de l'effet de serre, l'atmosphère est un bien public pur dont chacun use librement. A l'inverse, les ressources auxquelles nous faisions allusion dans le paragraphe précédent sont, le plus souvent, appropriables parce que matérielles et divisibles. La plupart du temps, elles appartiennent à une personne physique ou morale : cas des énergies fossiles, des mines ou des forêts. Cette différence s'avère cruciale. Sous un certain nombre d'hypothèses classiques (rationalité, concurrence pure et parfaite, information complète et anticipation parfaite), la détention privée d'une ressource épuisable, renouvelable ou environnementale garantit, à elle seule, son exploitation intertemporelle optimale. A contrario, la surexploitation du “service” de recyclage des gaz à effet de serre, offert gratuitement par l'atmosphère, découle immanquablement de son appropriation collective. Pour corriger cette externalité, une autorité supérieure doit simuler le “marché manquant” (Mäler, 1990) en proposant les incitations adéquates.

Techniquement, cela n'empêche pas la méthode de détermination de l'exploitation intertemporelle optimale d'une ressource d'être à peu près identique pour tous les cas. Simplement, la différence tient en deux phrases : dans le cas des ressources privées, c'est l'intérêt du propriétaire qui incite à suivre la trajectoire obtenue ; dans le cas de l'accroissement de l'effet de serre, et plus généralement des ressources communes ("La tragédie des espaces communaux", Hardin, 1968), le profil optimal doit être imposé de manière autoritaire aux usagers.

Dans ce chapitre, nous allons construire un modèle formalisant les interactions entre l'économie et le climat. Sa logique s'énonce comme suit. Le système économique produit des biens de consommation à l'aide d'un intrant polluant. Le gaz émis est rejeté dans l'atmosphère et y reste un certain temps, avant d'être capté par les océans. Pour fermer la boucle, le gaz accumulé réchauffe l'atmosphère, ce qui est néfaste pour l'activité productive.

Dans une première section, nous décrirons les propriétés qualitatives de la politique optimale du climat. Nous insisterons particulièrement sur la notion de prix implicite de la pollution, car elle est centrale dans toute l'analyse économique de l'effet de serre et donne lieu à la notion de taxe optimale sur les émissions. En supposant que le stock de pollution initial est plus petit que sa valeur stationnaire, hypothèse qui est a priori réaliste¹, nous montrerons que le prix implicite de la pollution et le stock de pollution augmentent avec le temps, tandis que l'émission diminue. L'économie rejoint un équilibre stationnaire, qui dépend fortement de la valeur du taux d'actualisation de l'utilité.

Les énergies fossiles sont la cause principale de l'effet de serre additionnel. Ainsi, l'extraction de ces ressources et l'émission des gaz à effet de serre découlent d'une seule et même décision, qui s'étudie en aménageant le modèle de Hotelling (1931). C'est ce que nous nous proposons de faire dans la seconde section de ce chapitre. Nous nous préoccupons surtout de l'évolution du prix implicite de la pollution dans ce nouveau contexte. A long terme, la

¹ - Le G.I.E.C. estime que la stabilisation de la concentration atmosphérique de gaz carbonique au niveau actuel requièreraient une réduction de 60 à 80 pour-cent de la consommation mondiale d'énergie fossile. Une telle mesure est à coup sûr hors de portée.

ressource responsable de la pollution est épuisée ; le gaz à effet de serre excédentaire et l'externalité climatique disparaissent. Il s'ensuit que le prix implicite de la pollution devient nul et qu'il doit globalement décroître avec le temps. Ulph & Ulph (1994), Sinclair (1994) et Farzin & Tahvonen (1996) tirent des implications pratiques de ce résultat et invitent les décideurs à y réfléchir. En effet, jusqu'à présent, tous les projets de limitation des émissions de dioxyde de carbone prévoient une taxe croissante avec le temps, en contradiction avec le résultat énoncé.

Pour notre part, nous doutons de l'utilité pratique de cette analyse, et ce pour deux raisons. D'abord, la dotation en ressources fossiles est suffisante pour multiplier par six le stock de dioxyde de carbone atmosphérique, ce qui laisse présager une aggravation sensible de l'effet de serre. Ensuite, lorsque la croissance est forte, les dommages subis peuvent continuer à augmenter, malgré une baisse de la pollution. La taxe sur le carbone devrait donc croître pendant un laps de temps assez long avant de décliner. Pour tester cette proposition, nous conclurons notre discussion, dans une troisième section, par une application numérique et nous montrerons que : la taxe optimale sur les émissions de gaz à effet de serre croît dans un premier temps puis décroît ensuite ; la première phase est d'autant plus longue que la dotation en ressources est grande, que le stock de pollution initial est petit et que le taux de croissance de l'économie est fort.

1.1 - Production - Pollution cumulative

Nous présentons ici le modèle le plus élémentaire possible. Il est inspiré de Cesar (1994), Gottinger (1991) et Nordhaus (1982). Bien que rudimentaire, il cerne bien les propriétés les plus caractéristiques de la politique du climat. Il se présente sous la forme d'un problème de commande optimale à horizon infini.

Problème n°1 :

$$\max_{g(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt \quad (1.1)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t), \quad (1.1a)$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)), \quad (1.1b)$$

$$G \geq G_0, \quad (1.1c)$$

$$g \geq 0, \quad \forall t. \quad (1.1d)$$

Le programme économique que nous nous proposons de résoudre repose sur la recherche du plus grand bien-être intertemporel, mesuré par l'intégrale (1.1). Les flux d'utilité successifs de la consommation $C(t)$ sont actualisés au taux δ . La variable de contrôle est l'émission du gaz à effet de serre, notée g . La variable d'état représente la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, notée G .

Module Economie - Atmosphère

Ce module explicite la relation entre l'activité économique et la composition de l'atmosphère. L'information correspondante est contenue dans l'équation différentielle (1.1a), qui régit la dynamique de la variable d'état.

La pollution apparaît sous la forme d'un input dans la fonction de production. Cette interprétation nous a semblé être la plus adaptée à la modélisation de l'effet de serre, puisque l'émission dépend principalement de la combustion des énergies fossiles. Une formalisation alternative aurait été de considérer que la pollution est un produit joint, i.e. directement proportionnelle à l'output. Mais, cette hypothèse devient gênante dès qu'il y a plus d'un facteur de production, car elle sous-entend que le ratio de pollution par unité produite est invariable, donc qu'il est impossible de choisir une technique de production plus propre, en substituant un facteur à la pollution.

L'activité économique dépend de l'émission du gaz polluant. Comme nous l'avons déjà souligné, l'effet de serre additionnel est une pollution cumulative. Dans la relation (1.1a), cette propriété implique que toute quantité g de gaz à effet de serre émise est accumulée dans l'atmosphère.

L'évolution de la concentration atmosphérique dépend également de la régénération naturelle de l'atmosphère. Ce mécanisme est assez mal connu (grossièrement, on sait seulement que 50 pour-cent des émissions sont, in fine, stockées dans l'atmosphère actuellement). Faute de mieux, les chercheurs formulent des hypothèses ad hoc. Celle que nous avons retenue est de loin la plus courante. Dans la relation (1.1a), nous supposons que la régénération naturelle par la biosphère est une fonction linéaire du stock de pollution ; le taux de recyclage β est donc constant. Certains auteurs choisissent un recyclage fixe quelle que soit la pollution, d'autres une fonction de recyclage logistique.

L'existence de la fonction de recyclage a des implications importantes. Du fait de la présence d'un tel mécanisme de régénération, il est possible d'émettre le gaz à effet de serre en quantités positives, tout en maintenant constante sa concentration atmosphérique. Cette propriété apprécie l'atmosphère, et le climat par la même occasion, à une ressource naturelle renouvelable, par opposition aux ressources épuisables.

Module Atmosphère - Climat

Ce module fait le lien entre la pollution de l'atmosphère et le climat de la planète. Cette relation a été présentée dans le chapitre préliminaire. Nous la simplifions de la manière suivante. Le réchauffement avéré à la date t est une fonction croissante, à taux croissant, de la concentration de gaz à effet de serre à cette date : $\Delta T(t) = \xi(G(t))$ ².

On a : $\xi'(G) > 0$, $\xi''(G) > 0$.

² - L'inertie climatique n'est pas introduite.

Module Climat - Economie

Dans ce module, nous traduisons les bouleversements climatiques en termes économiques. Pour commencer, nous supposons qu'ils auront des conséquences négatives sur le bien-être. Pezzey (1989) distingue deux types d'effets d'une pollution sur le bien-être : les pertes de valeurs d'agrément interviennent lorsque la qualité de l'environnement est un argument de la fonction d'utilité ; des effets contre-productifs surviennent lorsque la qualité de l'environnement apparaît dans la fonction de production. Dans notre formalisation, nous avons retenu l'hypothèse d'une externalité de production uniquement. L'effet contre-productif de l'effet de serre est incontestable (agriculture, santé...), ce qui explique notre choix. Nous décidons de ne pas tenir compte de la valeur d'agrément pour des raisons essentiellement pratiques : d'abord, mieux vaut éviter de trop compliquer le modèle ; de plus, autant l'externalité sur la production est clairement identifiable et mesurable, autant il paraît plus délicat de chercher à recenser, puis à mesurer, les pertes en bien-être directes résultant d'une modification climatique.

La production du bien de consommation composite dépend de l'émission du gaz à effet de serre et de l'état du climat. On utilise la fonction de production $F(g, \Delta T)$. Elle est supposée croissante, à taux décroissant, en g et décroissante, à taux décroissant, en ΔT .

On a : $F_g(g, \Delta T) > 0 > F_{gg}(g, \Delta T)$, $F_{\Delta T}(g, \Delta T) < 0$, $F_{\Delta T \Delta T}(g, \Delta T) < 0$ et $F_{g \Delta T}(g, \Delta T) < 0$.

En outre, $F(g, \Delta T)$ est supposée concave, i.e. $F_{gg}(g, \Delta T) \cdot F_{\Delta T \Delta T}(g, \Delta T) - [F_{g \Delta T}(g, \Delta T)]^2 \geq 0$.

Pour simplifier, nous utilisons une fonction de production déduite de celle-ci, qui permet d'éliminer la variable superflue ΔT : $f(g, G) = F(g, \xi(G))$. On démontre que cette fonction est strictement concave (voir l'annexe 1.1).

On a : $f_g(g, G) > 0 > f_{gg}(g, G)$, $f_G(g, G) < 0$, $f_{GG}(g, G) < 0$ et $f_{gG}(g, G) < 0$.

Puisqu'il n'y a pas d'investissement, Q mesure à la fois la quantité de biens produits $f(g, G)$ et la consommation C . La consommation procure une utilité $u(C)$. On a : $u'(C) > 0 > u''(C)$.

Pour garantir l'existence d'une solution intérieure, nous posons les hypothèses suivantes (Cesar, 1994) :

$$\lim_{Q \rightarrow 0} u'(C) = \infty, \quad (\text{H1})$$

$$\lim_{g \rightarrow 0} f_g(g, G) = \infty, \text{ quelle que soit } G, \text{ tant que } f(g, G) > 0, \quad (\text{H2})$$

$$\lim_{G \rightarrow 0} f_G(g, G) = 0. \quad (\text{H3})$$

1.1.1 - Résolution ³

La méthode de résolution utilisée fut énoncée par Pontriagine et alii (1961), sous le nom de “Principe du Maximum”. De très bons manuels d'application de cette théorie à l'économie et à la gestion sont disponibles (Arrow & Kurz, 1970 ; Kamien & Schwartz, 1981 ; Seierstad & sydsaeter, 1987 ; Lacaze, 1990 ; Léonard & Long, 1992).

Dans un premier temps, on forme la fonction Hamiltonienne courante, $p(t)$ désignant la variable adjointe à la variable d'état ⁴ :

$$\tilde{H}(G, g, p) = u(f(g, G)) - p \cdot (g - \beta \cdot G). \quad (1.2)$$

Soit $\langle G^*(t), g^*(t) \rangle$ la solution du problème n°1. Alors, il existe $p(t)$ continue et dérivable par morceaux et la solution optimale respecte les conditions suivantes :

$$g^* \text{ maximise } \tilde{H}(G^*, g, p). \quad (1.3)$$

³ - Voir l'appendice 1.

⁴ - Le Hamiltonien courant ne dépend pas du temps puisque, $H(G, g, p, t)$ étant le Hamiltonien et $e^{-\delta t} \cdot p$ la variable adjointe exprimée en valeur présente, alors

$$\tilde{H}(G, g, p) \cdot e^{-\delta t} = H(G, g, p, t) = e^{-\delta t} \cdot u(f(g, G)) - e^{-\delta t} \cdot p \cdot \dot{G}.$$

Pour une solution intérieure, le contrôle optimal satisfait les relations :

$$\tilde{H}_g(G^*, g^*, p) = f_g(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)) - p = 0, \quad (1.3a)$$

$$\tilde{H}_{gg}(G^*, g^*, p) < 0. \quad (1.3b)$$

L'équation différentielle suivante régit l'évolution de la variable adjointe :

$$\dot{p} = \tilde{H}_G(G^*, g^*, p) + \delta \cdot p = (\delta + \beta) \cdot p + f_G(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)). \quad (1.4)$$

L'“état terminal” du système vérifie la condition de transversalité suivante :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p^*(t) \cdot G^*(t) = 0. \quad (1.5)$$

Nous montrons, dans l'annexe 1.2, que les conditions nécessaires (1.3) à (1.5) sont également conditions suffisantes d'optimalité.

1.1.1.1 - La demande d'émission

La condition (1.3a) détermine implicitement l'émission optimale en fonction de l'état du climat et du prix implicite de l'accumulation du polluant. Elle définit donc la demande d'émission de gaz à effet de serre :

$$g^* = g(G, p). \quad (1.6)$$

Lemme 1.1 : La demande d'émission décroît avec le prix implicite du polluant (voir la propriété 1.1). Si l'utilité marginale de l'émission décroît avec la pollution ou, réciproquement, si les dommages climatiques augmentent avec la production, i.e. si $\partial(f_g \cdot u')/\partial G \leq 0$, la demande d'émission décroît avec la pollution.

Preuve : voir l'annexe 1.3.

Remarque 1.1 : Cesar (1994) montre que la condition $\partial(f_g, u')/\partial G \leq 0$ est satisfaite si la fonction de production est de la forme $f(g, G) = Y(g).D(G)$ et si l'élasticité de l'utilité marginale par rapport à la consommation est inférieure à l'unité, i.e. si $\sigma(C) = -u''(C).C/u'(C) < 1$.

1.1.1.2 - Synthèse et interprétations

En remplaçant g par la fonction de demande d'émission (1.6) dans (1.1a) et (1.4), on obtient un système de deux équations différentielles à deux inconnues :

$$\begin{cases} \dot{p} = (\delta + \beta).p + f_G(g(G^*, p), G^*).u'(f(g(G^*, p), G^*)) \\ \dot{G} = g(G^*, p) - \beta.G^* \end{cases} \quad (1.7)$$

Sachant la dotation initiale (1.1c) et la condition transversale (1.5), ce système est déterminé.

Propriété 1.1 : La variable adjointe agrège tous les coûts externes futurs imputables à la dernière unité de polluant accumulée. Toutes choses égales par ailleurs, ces flux de dommage disparaissent, au cours du temps, au taux $\delta + \beta$, en raison du mécanisme d'actualisation et de la régénération de l'atmosphère. La variable d'état mesure donc le coût marginal d'usage du polluant, ce qui justifie de l'interpréter comme son prix implicite.

Preuve : voir l'annexe 1.4 où il est démontré que :

$$p(t) = - \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot f_G(g, G).u'(f(g, G)) d\tau. \quad (1.8)$$

Si le dommage climatique est constant, quelle que soit la pollution, i.e. si $f_G(g, G) = 0$, alors le prix implicite de la pollution est nul. Il est alors optimal que l'émission soit gratuite. Dans le cas contraire, si $f_G(g, G) < 0$, le prix implicite est positif.

Remarque 1.2 : Au cours des commentaires subséquents, l'hypothèse d'un taux d'actualisation nul est utilisée de façon abusive. En effet, si tel est le cas, l'intégrale (1.1)

devient divergente et le problème n°1 ne peut plus être résolu. Néanmoins, sortie de ce contexte, nous utilisons l'hypothèse d'une actualisation nulle uniquement à des fins pédagogiques.

La relation (1.4) nous renseigne sur l'évolution du prix implicite de la pollution à travers le temps. Si le polluant est persistant ($\beta = 0$) et si le facteur d'actualisation est nul ($\delta = 0$), le prix implicite est maximum à l'instant initial et décroît ensuite, puisque $f_G \cdot u' < 0$. Lorsque l'actualisation est nulle, les consommations présentes et futures contribuent également au bien-être intertemporel, mesuré par l'intégrale (1.1) ; le prix implicite devrait donc être constant. Mais, si le polluant est persistant, l'émission présente est plus dommageable que les émissions futures ; il est donc préférable de retarder la pollution, ce qui justifie que le prix implicite de la pollution soit décroissant.

La présence d'un taux de régénération atmosphérique β positif fait que le prix implicite de la pollution peut croître avec le temps. Dans ce cas, l'émission présente accroît le recyclage futur du stock de pollution. Elle élargit l'ensemble des possibilités de production, puisqu'il devient possible de polluer plus sans dommages supplémentaires. Cette contrepartie positive à l'accumulation du gaz à effet de serre incite à choisir un prix implicite plus faible au départ, puis croissant ensuite, à mesure que le renforcement du dommage climatique compense l'effet bénéfique dont nous venons de parler.

Le facteur d'actualisation joue dans le même sens que le taux de recyclage. Lorsqu'il est positif, le consommateur attribue une pondération plus grande aux flux d'utilité présents. Ainsi, il préfère polluer plus aujourd'hui, quitte à subir des conséquences climatiques futures plus dures, mais dont l'évaluation est amoindrie par le mécanisme d'actualisation. Ceci incite logiquement à adopter un prix implicite faible au départ et croissant avec le temps.

L'internalisation des effets externes, imputables à l'émission du gaz à effet de serre, nécessite d'égaliser l'utilité marginale et le coût marginal indirect de la pollution. Cette propriété est remplie par le contrôle optimal du problème n°1. La dernière unité émise génère $f_g \cdot u'$ unités de bien-être. En contrepartie, une unité de gaz à effet de serre est accumulée

dans l'atmosphère, ce qui coûte p unités de bien-être. L'optimum est atteint quand les deux s'équilibrent, ce que garantit la condition (1.3a).

Propriété 1.2 : Le Hamiltonien courant mesure le produit net de l'économie, exprimé en termes d'utilité⁵.

Le Hamiltonien somme l'utilité de la consommation et le produit du coût marginal de la pollution par l'accroissement du stock de polluants (voir la relation (1.2)). Le premier élément évalue la richesse créée pendant l'exercice courant. Le second terme calcule sa contrepartie future, i.e. la perte d'utilité due à l'accumulation du polluant (à condition que le prix implicite soit correctement évalué). Le solde définit le bien-être net produit, envisagé d'un point de vue intertemporel.

Le Hamiltonien suggère donc un agrégat économique qui pourrait s'avérer utile à la planification : plus il est grand, plus le revenu net du coût écologique de l'activité économique est grand. En se reportant à la condition (1.3), on constate d'ailleurs que l'émission optimale est justement celle qui maximise le Hamiltonien. Ceci justifie que nous nous intéressons, à partir de maintenant, plus particulièrement au Hamiltonien maximum, qui est la valeur prise par le Hamiltonien lorsque le contrôle optimal est appliqué :

$$\tilde{H}^0(G, p) = \max_g \tilde{H}(G, g, p).$$

Soit $V(G^*(t), t) = \max_g \int_t^\infty e^{-\delta \tau} \cdot u(C) d\tau$ le bien-être intertemporel optimal du programme débutant à l'instant t avec un stock de polluants $G^*(t)$ ⁶. Par un simple changement de variables, i.e. en posant $s = \tau - t$, on démontre facilement que :

⁵ - On déduit une mesure du produit net en terme monétaire par approximation linéaire de l'utilité (Hung, 1991)

: $\text{PN} = \frac{\tilde{H}}{u'(C)} = C + \frac{p}{u'(C)} \cdot \dot{G}$.

⁶ - Egalement appelé "fonction de valeur optimale".

$$V(G^*(t), t) = \max_g e^{-\delta t} \cdot \int_0^\infty e^{-\delta s} \cdot u(C) ds = e^{-\delta t} \cdot V(G^*(t), 0). \quad (1.9)$$

La relation (1.9) prouve que le bien-être intertemporel du programme débutant à l'instant t avec une dotation initiale $G^*(t)$ est la valeur présente du gain associé au même problème, lorsque la date initiale est l'origine des temps. Ce résultat est caractéristique des problèmes autonomes à horizon infini (Léonard & Long, 1992, pp. 292 et 293).

L'égalité (1.9) et l'équation Hamilton-Jacobi-Bellman, appliquée à notre problème, permettent de déduire la relation suivante :

$$\tilde{H}^0(G^*(t), p^*(t)) = \delta \cdot V(G^*(t), 0). \quad (1.10)$$

Preuve : Voir l'annexe 1.5.

La relation (1.10) signifie que le produit net maximum s'apparente à un intérêt perçu sur le bien-être total maximum. A condition que le stock de pollution soit stationnaire ($\dot{G} = 0$), le Hamiltonien reste constant à travers le temps. Le flux de bien-être correspondant est donc un revenu au sens de Hicks, c'est-à-dire une rente obtenue sans réduction de la capacité future de l'économie à produire la même quantité de bien-être. Si la pollution varie, le produit net varie et la reproduction du système ne se fait plus à l'identique.

La recherche d'une trajectoire de développement soutenable et équitable entre les générations nécessite donc une accumulation nette de gaz à effet de serre nulle ou négative. Ce résultat n'est pas très pertinent car le présent modèle n'a pas les qualités requises pour traiter ces sujets. Notamment, il faudrait l'aménager en introduisant la possibilité d'accumuler du capital et/ou en faisant intervenir le progrès technique. Ce faisant, l'accumulation de capital à un rythme au minimum capable de compenser la dégradation de l'environnement, c'est-à-dire laissant intacte la capacité productive de l'économie, telle que le produit net la mesure, donnerait une approche plus satisfaisante de la notion de développement soutenable. Ceci ne sera pas fait parce que cette préoccupation échappe à notre problématique. En revanche, une synthèse rapide des différentes définitions de ce concept est proposée dans l'encadré 1.1.

Encadré 1.1 : Le développement soutenable

La conception Hicksienne du revenu constitue un bon point de départ pour caractériser le développement soutenable : à l'échelle macro-économique, le revenu est la quantité maximale de bien-être qui peut être obtenue au cours d'une période sans diminution du potentiel économique futur, i.e. de la faculté à reproduire le même flux de bien-être. Dans cette lignée, la plupart des définitions du développement soutenable requièrent un flux d'utilité sociale non décroissant à travers le temps. En caricaturant, il existe deux moyens pour que ce souhait soit exaucé.

Le premier consiste, pour le moins, à maintenir en l'état chaque composante de l'environnement économique et naturel, prise individuellement. Faucheux & Noël (1995) classent les tenants de ce principe de gestion dans la catégorie des partisans d'une soutenabilité forte. Ceux-ci défendent leur position :

1. en avançant l'argument d'une forte complémentarité entre le patrimoine naturel et le capital produit ;
2. en jugeant immoral le processus d'actualisation, qui revient implicitement à donner une importance différente à deux individus sur le motif qu'ils naissent à des moments différents.

L'autre moyen serait, pour le moins, de maintenir la capacité productive de l'environnement économique et naturel dans son ensemble. Cette règle relève, pour Faucheux & Noël, d'une soutenabilité faible, car elle tend à reconnaître la possibilité de compenser la destruction nette de certaines composantes, principalement le patrimoine naturel, par les autres, essentiellement le capital produit et le progrès technologique. Le principe de compensation invoqué découle de Hartwick (1977). Celle-ci prouve qu'un investissement égal à la rente de rareté d'une ressource environnementale quelconque rétablit exactement la capacité productive de l'économie.

La position intermédiaire est plus raisonnable. D'un côté, elle tolère la destruction de certaines composantes du patrimoine naturel, à condition qu'elle soit compensée par l'accumulation de capital et le progrès technologique : recherche de technologies de remplacement dans le cas des ressources épuisables ; destruction d'écosystèmes locaux en vue d'aménagements soutenables. Dans le même temps, elle reconnaît les particularités du patrimoine naturel, lorsqu'il est vu comme le vecteur de la vie, comme une source d'agrément esthétiques et culturels, comme la base de découvertes scientifiques et médicales (biodiversité)... Elle suggère :

1. d'accepter les principes de la soutenabilité faible, lorsque les composantes du patrimoine naturel qui sont menacées peuvent être remplacées à coup sûr ;
2. de respecter un certain nombre de normes environnementales, définies précisément pour préserver les fonctions de l'environnement essentielles à la vie et non substituables par des biens artificiels.

Cette approche du développement soutenable est défendue par ceux qui appartiennent à l'école de Londres (Barbier & Markandya, 1990 ; Pearce, 1988 ; Pearce & alli, 1989), selon la terminologie de Faucheux & Noël.

Jusqu'ici, nous nous sommes attachés à faire le point sur la signification et l'implication économiques des variables et des relations utilisées pour résoudre le problème n°1. Cette discussion n'éclaire en rien la nature de la mesure à mettre en place : Comment évolue-t-elle ? A quoi conduit-elle ? Pour répondre à ces questions, nous énonçons, dans la section subséquente, les propriétés qualitatives de la politique optimale de l'effet de serre.

1.1.2 - Propriétés qualitatives de la dynamique optimale

1.1.2.1 - Le diagramme des phases

Constatons avant de commencer l'exposé qui va suivre que le temps n'apparaît pas explicitement dans le système (1.7). Cette propriété caractérise un problème dit autonome. Elle nous permet de recourir à la méthode graphique que nous débutons maintenant.

Nous voulons obtenir une représentation graphique de la trajectoire optimale dans le diagramme des phases (G, p) . Quel que soit le point de ce plan, les équations différentielles du système (1.7) expriment la direction et la vitesse de déplacement du système.

Pour analyser les propriétés du système dans le diagramme des phases, nous commençons par rechercher les lieux des points où \dot{p} et \dot{G} s'annulent. Nous définissons donc les ensembles P et G respectivement, avec :

$$P = \{(G, p) / \dot{p} = 0; p \geq 0, G \geq 0\} \text{ et } G = \{(G, p) / \dot{G} = 0; p \geq 0, G \geq 0\}.$$

Lemme 1.2 : Les isoclines P et G possèdent les propriétés suivantes :

- La courbe représentant P a une pente non décroissante ;
- La courbe représentant G est de pente non croissante ;
- Tout point au-dessus de l'isocline P a une vitesse \dot{p} positive, et inversement ;
- Tout point au-dessus de l'isocline G a une vitesse \dot{G} négative, et inversement.

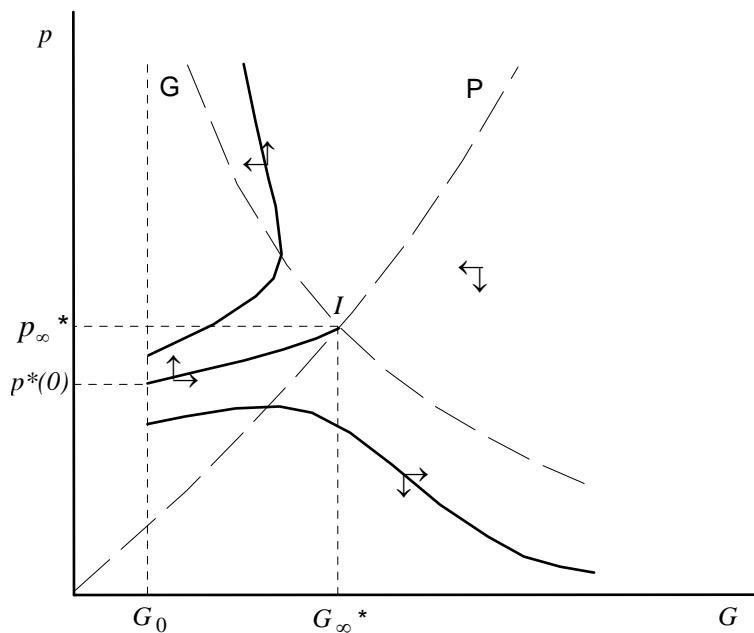
Preuve : Voir l'annexe 1.6.

Proposition 1.1 : Un point élément des isoclines P et G simultanément définit l'état stationnaire du système. Si ce point existe, compte tenu du lemme 1.2, il est unique. Nous supposons son existence et nous le notons $I(G_\infty^*, p_\infty^*) \in P \cap G$.

Nous proposons une représentation du diagramme des phases dans le graphique 1.1. Y figurent les isoclines P et G et trois trajectoires faisables, dont une converge vers le point stationnaire I . Lorsque le point initial est un point quelconque de ce plan, l'économie dirigée par le système (1.7) décrit une trajectoire faisable non admissible. La trajectoire est admissible si elle respecte les contraintes du modèle : dans le cas présent, toute trajectoire admissible part de la pollution d'origine G_0 . La trajectoire optimale est une trajectoire admissible et faisable (voir le glossaire), vérifiant en plus la condition de transversalité (1.5).

Remarque 1.3 : Les résultats et les commentaires subséquents s'appliquent dans le cas où le stock de pollution d'origine est inférieur au stock de pollution stationnaire, i.e. $G_0 < G_\infty^*$. Cette hypothèse réduit le degré de généralité de la discussion, mais s'applique raisonnablement bien à l'effet de serre, puisque les projections prévoient une élévation importante des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre.

Graphique 1.1 : Diagramme des phases



1.1.2.2 - Dynamique optimale

Théorème 1.1 : La dynamique optimale conduit l'économie de l'état initial donné à l'état stationnaire.

Preuve : Le point stationnaire a pour coordonnées $(G_{\infty}^*, p_{\infty}^*)$. Puisque le stock de gaz à effet de serre et le prix implicite de l'accumulation du gaz à effet de serre sont finis, $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p_{\infty}^* \cdot G_{\infty}^* = 0$ et on vérifie la condition (1.5).

Propriété 1.3 : Lorsque $G_{\infty}^* > G_0$, la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre et le prix implicite du polluant, i.e. le coût marginal intertemporel d'une unité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, croissent avec le temps.

Preuve : Léonard & Long (1992), théorème 9.5.1., pp. 294-295.

Propriété 1.4 : Lorsque $G_{\infty}^* > G_0$, l'émission du gaz à effet de serre et la consommation diminuent avec le temps. Elles tendent asymptotiquement vers leurs valeurs stationnaires, fonction des valeurs d'équilibre de la pollution et du coût marginal intertemporel de l'effet de serre.

Preuve : Nous avons démontré précédemment que l'émission est une fonction décroissante de G et de p . Du fait des trajectoires optimales de ces deux variables (voir la propriété 1.3), g^* décroît avec le temps. Comme la consommation $C = f(g, G)$ est une fonction croissante de g et décroissante de G , elle diminue avec le temps.

1.1.2.3 - L'état stationnaire

Compte tenu des résultats de la section précédente, il n'est pas besoin de justifier de l'utilité d'une analyse détaillée des propriétés de l'équilibre stationnaire.

Théorème 1.2 : L'état stationnaire du système respecte les propriétés suivantes :

$$\dot{G}(\infty) = 0 \Leftrightarrow g_{\infty}^* = \beta \cdot G_{\infty}^*, \quad (1.11)$$

$$\dot{p}(\infty) = 0 \Leftrightarrow p_{\infty}^* = -\frac{f_G(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*) \cdot u'(f(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*))}{\delta + \beta}, \quad (1.12)$$

$$f_g(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*) \cdot u'(f(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*)) = p_{\infty}^*. \quad (1.13)$$

Preuve : Ces propriétés s'obtiennent directement à partir des conditions (1.1a), (1.4) et (1.3a).

L'état stationnaire préserve l'équilibre de l'écosystème (voir la relation (1.11)). L'émission du polluant est entièrement recyclée par la biosphère et il se produit une stabilisation du climat. La politique optimale du climat est donc en conformité avec la Convention-cadre sur les changements climatiques (Rio de Janeiro, 1992), puisque celle-ci se fixe pour « objectif ultime ... de stabiliser ... les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ».

Le prix implicite de l'émission est égal à la valeur présente des flux de dommages marginaux futurs (voir l'expression (1.12)). On l'obtient en agrégeant, sur une durée infinie, le dommage marginal constant du réchauffement planétaire, en tenant compte du taux de recyclage du polluant par l'écosystème et du taux de préférence pour le présent :

$$p_{\infty}^* = Dm_{\infty}^* \cdot \int_0^{\infty} e^{-(\delta+\beta)\tau} d\tau = Dm_{\infty}^* \cdot \left[\frac{e^{-(\delta+\beta)\tau}}{\delta + \beta} \right]_0^{\infty} = \frac{Dm_{\infty}^*}{\delta + \beta},$$

où $Dm_{\infty}^* = -f_G(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*) \cdot u'(f(g_{\infty}^*, G_{\infty}^*))$ est le flux de dommage marginal à l'équilibre.

L'allocation intertemporelle optimale des ressources est assurée puisque l'utilité marginale de l'émission s'égalise à son coût marginal intertemporel (voir la relation (1.13)).

En combinant les relations (1.11) à (1.13), on détermine une expression qui synthétise l'ensemble des propriétés de l'équilibre stationnaire :

$$\frac{\rho}{\beta} = -\frac{e_G}{\delta + \beta}, \quad (1.14)$$

où ρ et e_G sont les élasticités de la production par rapport aux émissions et à la pollution respectivement.

Une hausse des émissions de un pour-cent accroît immédiatement la production de ρ pour-cent. Mais, l'accroissement consécutif du stock de gaz à effet de serre permet également de polluer plus à l'avenir, sans alourdir le dommage de l'effet de serre. D'un point de vue intertemporel, le supplément d'émissions considéré permet donc d'accéder à une croissance de ρ/β pour-cent de la production.

Le même raisonnement permet de comprendre le terme de droite de (1.14). A court terme, toute élévation de la pollution de un pour-cent réduit la production de $-e_G$ pour-cent. En tenant compte des conséquences futures, c'est une baisse de $-e_G/(\delta + \beta)$ pour-cent de la production qui doit être comptabilisée.

Propriété 1.5 : La concentration et l'émission stationnaire augmentent avec le taux d'actualisation. La consommation stationnaire diminue lorsque le taux d'actualisation augmente.

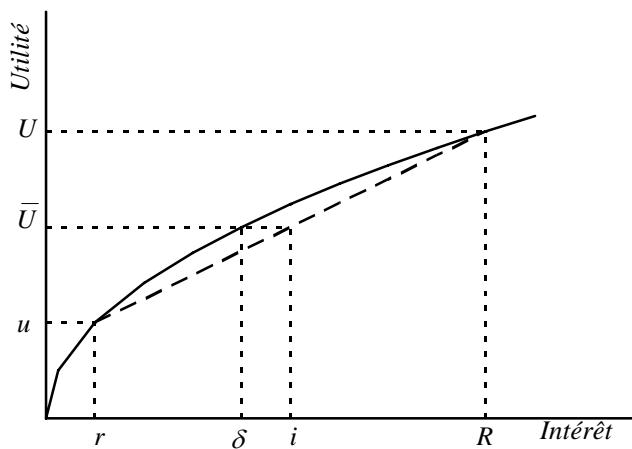
Preuve : Voir l'annexe 1.7.

Remarque 1.4 : L'état stationnaire montre que l'approche utilitariste de la politique climatique garantit, à long terme, un bien-être constant à toutes les générations. Cette qualité reste toutefois insuffisante pour remplir les objectifs du développement soutenable. En premier lieu, avant d'atteindre cet équilibre, les flux d'utilité décroissent, si bien que les générations éloignées sont lésées. En second lieu, comme le montre la propriété 1.5, cette asymétrie entre les générations dépend du taux d'actualisation, dont la valeur est très controversée (voir l'encadré 1.2).

Encadré 1.2 : Valeur du taux d'actualisation social
Argumentation basée sur le coût d'opportunité des investissements publics :

Les investissements publics détournent une partie de l'épargne des placements privés. Leur coût d'opportunité est donc égal au taux d'intérêt du marché, justifiant d'égaliser le taux d'actualisation social au taux de rendement privé (Baumol, 1968). Pour Arrow (1995), ce raisonnement est incomplet, voire « fallacieux », pour deux raisons.

Premièrement, les deux placements ne sont pas homogènes. Alors que l'investissement privé est risqué, l'investissement public peut être vu comme certain (loi des grands nombres, diversification de portefeuille, pas de risque d'insolvabilité). La prime de risque incorporée au taux d'intérêt du marché n'a donc pas lieu d'apparaître dans le taux d'actualisation social.



Dans le graphique ci-dessus, un investisseur quelconque choisit de placer une somme d'argent soit en bons du trésor, qui rapportent un intérêt δ , soit sur le marché boursier, qui rapporte un intérêt r avec une probabilité p et R avec une probabilité $1-p$. Il tire une utilité U du revenu obtenu (la fonction d'utilité est supposée concave, traduisant une aversion pour le risque). Le taux d'intérêt du marché est égal à i . On observe facilement que le taux de rendement non risqué δ de l'investissement public est suffisant pour attirer les investisseurs. Il est égal au taux du marché moins la prime de risque.

Deuxièmement, l'argument du coût d'opportunité ne fonctionne que si le taux d'éviction de la politique publique est de 100 pour-cent. Or, dans le cas d'une mesure de lutte contre l'effet de serre, consistant à taxer les énergies fossiles sur la base de leur contenu en carbone, l'effet d'éviction est faible. Ainsi, imaginons que le coût de la politique soit de 1 pour-cent du P.I.B. Avec un taux d'épargne fixe de 20 pour-cent, l'argument du coût d'opportunité ne joue que sur les $0,01 \times 0,2 = 0,2$ pour-cent du P.I.B. détourné de l'investissement privé.

Argumentation basée sur la valorisation du futur :

Deux raisons incitent les individus à privilégier la consommation présente. En premier lieu, les taux d'épargne observés suggèrent que les agents économiques ressentent une préférence pure pour le présent (Arrow, 1995). En second lieu, la poursuite de la croissance économique, combinée à l'hypothèse raisonnable de la décroissance de l'utilité marginale de la consommation, suggère que les unités de consommation présentes ont plus de valeurs que celles qui suivront. Evidemment, cette seconde composante intervient

seulement dans l'actualisation entre unités de consommation, pas entre unités d'utilité (Nordhaus, 1992b).

1.1.3 - Décentralisation

En suivant Cesar (1994), considérons un consommateur représentatif, un producteur représentatif et un gouvernement. Supposons que le gouvernement mette en oeuvre une politique de lutte contre l'effet de serre en levant une taxe γ sur chaque unité de gaz à effet de serre émise.

Le producteur représentatif détermine son émission de gaz à effet de serre en tenant compte de la politique d'environnement menée. Son profit est $\Pi = f(g, G) - \gamma \cdot g$, où le prix de marché du bien composite produit est supposé unitaire. Il est maximum lorsque $f_g(g, G) = \gamma$, sachant que l'état du système est donné (il s'agit bien d'un maximum puisque $f_{gg}(g, G) < 0$ par hypothèse).

Le consommateur représentatif maximise son utilité intertemporelle. Sa contrainte de budget est donnée par $C = \Pi + \gamma \cdot g$. A chaque instant, sa consommation est égale à ses revenus, somme des profits réalisés par l'économie et de la redistribution du produit de la taxe.

Dans cette économie, il suffit que le gouvernement choisisse $\gamma = p/u'(C)$ pour que l'on soit à l'optimum. On vérifie en effet que, dans ce cas, l'optimum du producteur implique que $f_g(g, G) \cdot u'(C) = p$, ce qui correspond à la relation (1.3a). Il s'ensuit que la taxe pigovienne est égale au rapport du prix implicite de la pollution sur l'utilité marginale de la consommation (Pigou, 1920).

1.2 - Production - Pollution cumulative - Ressource épuisable

L'accroissement de l'effet de serre et l'épuisement des réserves d'énergies fossiles sont indissociables. L'émission mondiale de dioxyde de carbone résulte essentiellement de la

combustion du pétrole, du gaz naturel et du charbon. Leur épuisement laisse donc entrevoir une issue forcée aux problèmes climatiques, même si l'échéance reste assez lointaine.

Contrairement à l'hypothèse de Cesar (1994), qui souligne que celle-ci est suffisamment éloignée pour être négligée, certains auteurs affirment que cette limite est active et influence la politique du climat.

Lorsque cette contrainte n'est pas prise en compte, situation qui est décrite dans la section précédente, l'économie rejoint un équilibre stationnaire, caractérisé par un flux d'émission positif et un stock de gaz à effet de serre stabilisé ; les émissions cumulées de polluants sont infinies. Cette trajectoire ne peut donc pas être suivie, si l'on tient compte de l'épuisement des ressources nécessaires à ces émissions.

Les interactions entre l'accroissement de l'effet de serre et l'épuisement des ressources fossiles ont été étudiées par Farzin & Tahvonen (1996), Sinclair (1994) et Ulph & Ulph (1994). Leur préoccupation commune est de déterminer le rôle de la contrainte d'épuisement dans l'évolution temporelle de la taxe optimale sur le carbone⁷. Ulph & Ulph (1994) utilisent une application numérique simple pour le cas où le taux de recyclage du stock de polluants est constant. Ils concluent que la taxe sur les émissions croît dans un premier temps, si le stock initial de polluants est faible, puis diminue jusqu'à l'épuisement complet de la ressource. Farzin & Tahvonen (1996) insistent sur le fait que le recyclage exponentiel du stock de polluants est la cause de ce profil temporel. De fait, si le polluant est persistant (recyclage nul), il est aisément de montrer que la taxe croît de façon monotone. S'appuyant sur une formalisation plus complexe du cycle du carbone, combinant un stock persistant et un stock régénéré à un taux constant, ils montrent, par simulation numérique, que la taxe peut avoir d'autres profils que ceux déterminés sous les hypothèses standards.

L'inconvénient commun à tous ces travaux vient du postulat selon lequel le dommage ne dépendrait pas du niveau de production. Cette hypothèse n'est pas défendable si l'effet de serre réduit la capacité productive des économies, comme le supposent toutes les évaluations des dommages.

⁷ - Cette terminologie est abusive. En effet, ces articles assimilent taxe optimale et prix implicite.

Dans cette section, nous aménagerons donc le problème n°1 pour étudier l'interaction entre l'externalité climatique et l'épuisement des ressources fossiles (la variable d'état S désigne la dotation en ressources et $\dot{S} = -g$ définit l'extraction), en évitant l'hypothèse critiquée ci-dessus. Dans la section suivante, nous montrerons, à l'aide d'une simulation numérique, que les résultats de Ulph & Ulph (1994), Sinclair (1994) et Farzin & Tahvonen (1996) résistent à cette configuration, mais perdent leur utilité pratique si la croissance économique est forte.

Problème n°2 :

$$\max_{g(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt \quad (1.15)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t), \quad (1.15a)$$

$$\dot{S}(t) = -g(t), \quad (1.15b)$$

$$S(t) = S_0 - \int_0^t g(\tau) d\tau \geq 0, \quad (1.15c)$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)), \quad (1.15d)$$

$$G(0) = G_0, \quad (1.15e)$$

$$S(0) = S_0, \quad (1.15f)$$

$$g(t) \geq 0, \quad \forall t. \quad (1.15g)$$

1.2.1 - Résolution ⁸

La Hamiltonien courant a pour expression :

$$\tilde{H}(G, S, g, p, q) = u(f(g, G)) - p \cdot (g - \beta \cdot G) - q \cdot g. \quad (1.16a)$$

Le Lagrangien, associé à la contrainte de non-négativité du stock de ressources S , s'écrit :

$$\tilde{L}(G, S, g, p, q, \lambda) = \tilde{H}(G, S, g, p, q) + \lambda \cdot S. \quad (1.16b)$$

$\langle G^*(t), S^*(t), g^*(t) \rangle$ étant la solution du problème n°2, p et q étant les variables adjointes associées aux variables d'état G et S respectivement, et λ étant le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'épuisement (1.15c), les conditions d'optimalité s'écrivent⁹ :

$$f_g(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)) = p + q, \quad (1.17)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + f_G(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)), \quad (1.18)$$

$$\dot{q} = \delta \cdot q - \lambda, \quad (1.19)$$

avec $S \geq 0$, $\lambda \geq 0$ et $\lambda \cdot S = 0$.

En outre, la trajectoire optimale vérifie les deux conditions de transversalité suivantes :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p^*(t) \cdot G^*(t) = 0, \quad (1.20)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot q^*(t) \cdot S^*(t) = 0. \quad (1.21)$$

La condition (1.17) implique que la productivité marginale de la ressource doit être égale à son prix. Ce dernier est la somme de la rente de rareté¹⁰ et du prix implicite attribué à l'accumulation marginale du gaz à effet de serre. Tant que la ressource n'est pas épuisée, la relation (1.19) signifie que la rente de rareté croît au rythme du taux d'actualisation (Hotteling, 1931). Elle est donc constante en valeur présente. Ainsi, chaque unité de ressource extraite contribue de la même façon au bien-être intertemporel mesuré par l'intégrale (1.15). Si tel n'était pas le cas, il serait possible d'accroître le bien-être, en réduisant l'extraction aux dates où l'utilité marginale de la ressource est plus faible, pour l'augmenter aux autres moments, et ce jusqu'à égalisation à toute date.

1.2.2 - Trajectoires d'épuisement et rente de rareté

⁸ - Voir l'appendice 1.

⁹ - Voir l'annexe 1.8 pour les conditions suffisantes d'optimalité.

Nous consacrons cette section à la description du devenir du stock de ressource en fonction des conditions économiques régissant son exploitation. On distingue deux situations.

Avec la première, la ressource n'est jamais épuisée car elle devient inutile à l'activité économique à partir d'une date donnée ¹¹. Du fait des relations (1.19) et (1.19a), on a alors $S(t) > 0$, $\lambda(t) = 0$ et $q(t) = q_0 \cdot e^{\delta t}$ à toute date. La condition transversale (1.21) devient $\lim_{t \rightarrow \infty} q_0 \cdot S(t) = 0$ et la rente de rareté q_0 est nulle. Dès lors, du fait de (1.17), il s'ensuit que ce scénario se réalise si le prix implicite de la pollution est suffisant pour que l'extraction de la ressource cesse, c'est-à-dire si l'externalité climatique est forte au point d'obliger à adopter l'objectif de long terme d'une pollution nulle.

Ceci se produit éventuellement lorsque l'équilibre stationnaire du problème n°1 appartient à l'axe des ordonnées (voir le graphique 1.1). Alors, quelle que soit la pollution initiale, l'émission et le stock de polluants décroissent continûment jusqu'à être nuls. Si l'extraction cumulée, le long de cette trajectoire, satisfait la contrainte (1.15c), l'épuisement de la ressource n'est pas saturant, on a effectivement $q(t) = 0$, $\forall t$, et la solution du problème n°1 est aussi solution du problème présent. Remarquons que, dans ce cas, le prix implicite de la pollution décroît avec le temps, puisque le stock de polluants stationnaire est plus petit que le stock initial.

Cette première situation est un cas particulier. Elle se produit à condition que $f_g(0,0) \leq -f_G(0,0)/(\delta + \beta)$ (voir les relations (1.11) à (1.13)). Deux conditions doivent donc être remplies : d'une part, le dommage marginal de l'effet de serre doit être positif lorsque le stock de gaz est nul et, d'autre part, le dommage marginal d'une pollution nulle doit être suffisant pour décourager l'extraction de la ressource.

L'autre cas de figure est celui où la ressource est épuisée. Il se subdivise en deux, selon que la date d'épuisement est finie ou infinie.

¹⁰ - La rente de rareté est la différence entre le prix et le coût marginal d'extraction de la ressource. Dans le cas présent, puisque le coût d'extraction est supposé nul, elle est égale à q .

¹¹ - L'inutilité doit être entendue dans le sens de non-créateur de bien-être.

L'extraction de la totalité du stock de ressource prendra une durée infinie si l'utilité marginale de cet input est infinie quand il est utilisé en quantités infinitésimales, i.e. si $f_g(g, G) \rightarrow \infty$ et/ou $f(g, G) \rightarrow 0$ quand $g \rightarrow 0$. Dans ce cas, on vérifie en effet que, lorsque l'extraction tend vers zéro, l'égalité (1.17) ne peut pas être satisfaite puisque $p(t)$ et $q(t)$ sont finis. Les deux propriétés limites impliquent donc que $g(t) > 0$ pour tout $t \geq 0$ (Dasgupta & Heal, 1974). Le long de la trajectoire optimale, on a alors $S(t) > 0$, $\lambda(t) = 0$ et $q(t) = q_0 \cdot e^{\delta t}$. Dans ce cas, la condition transversale (1.21) s'écrit $\lim_{t \rightarrow \infty} q_0 \cdot S(t) = 0$ et la ressource est épuisée asymptotiquement : $q_0 > 0$ et $\lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 0$.

L'épuisement se produit à une date finie T si l'utilité marginale de la ressource est finie quand elle est utilisée en quantités infinitésimales, i.e. si $f_g(g, G)$ et $f(g, G)$ sont finies quand $g \rightarrow 0$. Jusqu'à cette date, on a $S(t) > 0$, $\lambda(t) = 0$ et $q(t) = q_0 \cdot e^{\delta t}$. A l'instant T , $S(T) = 0$, $\lambda(T) \geq 0$ et $p(T) + q_0 \cdot e^{\delta T} = f_g(0, G(T)) \cdot u'(f(0, G(T)))$.

Ayant décrit tous les cas de figure possibles, nous adoptons à nouveau la condition (H2) posée au début de ce chapitre. Nous retenons donc l'hypothèse d'un épuisement asymptotique.

1.2.3 - Prix implicite de la pollution

Dans cette section, nous essayons de décrire la trajectoire du prix implicite des émissions analytiquement. En fait, comme le lecteur s'en apercevra vite, il s'avère difficile d'analyser ce modèle et les résultats donnés ici seront surtout utiles pour l'analyse numérique qui suit.

Puisque l'extraction cumulée de la ressource est bornée, l'émission et le stock de gaz à effet de serre tendent vers zéro à l'infini. L'externalité climatique finit donc par disparaître. En

appliquant la relation (1.8), on trouve que le prix implicite de la pollution tend vers la valeur $-f_G(0,0).u'(f(0,0))/(δ+β)$. Si le dommage marginal d'une pollution nulle est non nul, i.e. si $f_G(g,0) \neq 0, \forall g$, alors le prix implicite de la pollution est strictement positif à l'infini. L'hypothèse contraire $f_G(g,0)=0$, qui est systématiquement posée (Cesar, 1994 ; Farzin et Tahvonen, 1996 ; Nordhaus, 1992a, 1993 et 1996 ; Clarke & Reed, 1994) et que nous retenons également (voir la condition (H3) en début de chapitre), implique que le prix implicite tend vers zéro à l'infini. Cette propriété est nécessaire pour respecter la condition de transversalité (1.20). En effet, pour t grand, puisque le dommage marginal est quasi nul, l'équation différentielle (1.18) peut être approximée par $\dot{p}=(δ+β).p$. Dès lors, si le prix implicite n'est pas nul, il croît au taux $δ+β$ et $e^{-δt}.p(t)$ ne converge pas.

Ainsi, si nous retenons l'hypothèse d'un dommage marginal nul quand la pollution est nulle, le prix implicite de la pollution est strictement positif à l'instant initial et devient nul à l'infini. Ceci confirme les conclusions de Ulph & Ulph (1994), Sinclair (1994) et Farzin & Tahvonen (1996). L'épuisement des ressources fossiles modifie donc radicalement le profil de la taxe optimale. Son intensité, qui était croissante dans le problème n°1, devient décroissante avec le nouveau jeu d'hypothèses. Il reste maintenant deux points à préciser. Premièrement, l'épuisement de la ressource a-t-il pour effet de réduire le prix implicite ? Deuxièmement, le prix de la pollution décroît-il uniformément, ou bien existe-t-il des périodes de hausse et de baisse ?

La comparaison de deux situations extrêmes, l'une où la dotation initiale en ressources est nulle, l'autre où elle est infinie, répond partiellement à la première question. Lorsque le stock de ressources est épuisé à l'instant initial, les émissions sont nulles à toute date, si bien que la dynamique du stock de polluants se limite au recyclage exponentiel du stock initial : $G(t)=G_0.e^{-βt}$. On en déduit la trajectoire du prix implicite de la pollution $p(t)=-\int_t^{\infty} e^{-(δ+β)(τ-t)}.f_G(0,G_0.e^{-β.τ}).u'(f(0,G_0.e^{-β.τ}))dτ$. La taxe est alors une fonction monotone décroissante du temps.

Preuve : On démontre, dans un premier temps, que le dommage marginal décroît avec le temps, i.e. $-\partial \left[f_G(0, G_0 \cdot e^{-\beta t}) \cdot u'(f(0, G_0 \cdot e^{-\beta t})) \right] / \partial t = \beta \cdot G_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot (f_{GG} \cdot u' + f_G^2 \cdot u'') < 0$. Il s'ensuit que le prix implicite $p(t)$ est inférieur à $-f_G(0, G_0 \cdot e^{-\beta t}) \cdot u'(f(0, G_0 \cdot e^{-\beta t})) / (\delta + \beta)$ à toute date. D'où, $\dot{p}(t) = (\delta + \beta) \cdot p(t) + f_G(0, G_0 \cdot e^{-\beta t}) \cdot u'(f(0, G_0 \cdot e^{-\beta t})) < 0$ quelle soit t .

Lorsque le stock est infini, la ressource n'est pas épuisable et la rente de rareté est nulle. Ceci redéfinit le problème n°1. Si $G_0 < G_\infty^*$, le stock de polluants croît avec le temps. Le prix implicite de la pollution est égal à $p(t) = -\int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot f_G(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)) d\tau$ et augmente continûment. Il tend vers une valeur stationnaire, définie par $p_\infty^* = -f_G(g_\infty^*, G_\infty^*) \cdot u'(f(g_\infty^*, G_\infty^*)) / (\delta + \beta)$.

Les prix implicites des deux cas extrêmes peuvent être comparés à toute date. Puisque $g^*(t) > 0$ et $G^*(t) > G_0 \cdot e^{-\beta t}$, $\forall t$, le dommage marginal subi par l'économie disposant d'une quantité infinie de ressources dépasse celui dont souffre l'économie qui ne pollue jamais : $-f_G(g^*(\tau), G^*(\tau)) \cdot u'(f(g^*(\tau), G^*(\tau))) > -f_G(0, G_0 \cdot e^{-\beta \tau}) \cdot u'(f(0, G_0 \cdot e^{-\beta \tau}))$, $\forall t$.

Du fait de la relation (1.8), on conclut sans détour que le prix implicite est plus grand lorsque la ressource n'est pas épuisable.

Intuitivement, ce résultat se comprend très bien. On imagine même sans peine qu'il reste valable dans le cas général. La contrainte d'épuisement limite les émissions et réduit les dommages climatiques. Il semble donc normal que la taxe sur les émissions diminue. Malheureusement, alors que ceci se démontre facilement pour les deux cas de figure vus à l'instant, nous ne sommes pas parvenus à le démontrer pour le cas général. Pour pallier cette lacune, une analyse numérique sera proposée plus loin.

De même, nous n'avons pas été capables de décrire l'évolution du prix implicite de l'accumulation du gaz à effet de serre dans le cas général. Nous pouvons, par contre, emprunter la démonstration de Farzin & Tahvonen (1996), pour l'appliquer au cas particulier

défini par l'hypothèse $\partial(f_G \cdot u')/\partial g = 0$. Cette hypothèse signifie à la fois que le dommage marginal en termes d'utilité dépend uniquement du niveau de pollution et que la productivité marginale de la ressource n'est pas modifiée par la pollution. Dans ce contexte, imaginons que le prix implicite du polluant décroisse jusqu'à une date T_1 , croisse entre T_1 et T_2 , puis décroisse indéfiniment jusqu'à sa valeur limite.

En calculant les différentielles totales de (1.17) et (1.18), on montre que :

$$\dot{g} = \frac{\dot{p} + \delta \cdot q}{\tilde{H}_{gg}}, \quad (1.22)$$

$$\ddot{p} = (\delta + \beta) \cdot \dot{p} + \tilde{H}_{GG} \cdot \dot{G}. \quad (1.23)$$

Tableau 1.1 : Tableau de variation découlant du sentier supposé de p

	T_1	\hat{T}	T_2
p	↓	↑	↓
\dot{p}	–	0	+
\ddot{p}		+	–
\dot{G}		–	0
G		$G(T_1) \downarrow$	$G(\hat{T}) \uparrow G(T_2)$

Note : pour construire ce tableau, on part de l'hypothèse sur l'évolution du prix implicite de la pollution, puis on utilise les relations (1.22) et (1.23) pour déduire les autres informations

À la date T_1 , $\dot{p} = 0$ et $\ddot{p} > 0$ puisque le prix augmente entre T_1 et T_2 . Compte tenu de (1.23), on en déduit que le stock de polluants est décroissant à l'instant T_1 . De même, on démontre que le stock est croissant à la date T_2 . Il existe donc une date $\hat{T} \in]T_1, T_2[$ telle que $\dot{G}(\hat{T}) = 0$.

Il s'ensuit que $g(\hat{T}) = \beta \cdot G(\hat{T}) < \beta \cdot G(T_2) < g(T_2)$. Sachant que, par hypothèse, le prix implicite p augmente entre T_1 et T_2 et compte tenu de (1.22), on devrait observer le contraire, i.e. $g(\hat{T}) > g(T_2)$. Ce résultat démontre, par l'absurde, qu'une période pendant

laquelle le prix implicite décroît ne peut pas précéder une période pendant laquelle il croît. En conséquence, la trajectoire de p est soit monotone décroissante, soit possède la forme d'un U renversé.

Ce résultat étant démontré, revenons à l'hypothèse que nous avons dû poser pour l'établir. Farzin & Tahvonen (1996) supposent que l'utilité est une fonction directe de l'extraction de la ressource, i.e. $u(g)$, et que le dommage dépend uniquement du stock de pollution, i.e. $D(G)$. Le bien-être net s'écrit donc $u(g) - D(G)$ et la restriction est implicitement contenue dans leur spécification. Il se pose la question de savoir si cela ne modifie pas la nature des résultats.

Dans le cas de l'effet de serre, le dommage croît avec la production ; toutes les études quantitatives partent de cette hypothèse. La spécification de Farzin & Tahvonen (1996) ne reflète pas cette propriété. Cela n'est pas gênant si la production varie peu, car la fonction de dommage continue à refléter correctement les nuisances subies. Par contre, si l'on introduit le progrès technique, le dommage physique croît au rythme du taux de croissance, même si le niveau de pollution ne varie pas. Ceci affecte nécessairement la taxe optimale. On peut alors penser que les résultats de Farzin & Tahvonen (1996) ne s'appliquent plus aussi bien. Nous essayerons de tester cette hypothèse dans la simulation numérique que nous débutons maintenant.

1.3 - Application numérique

A plusieurs reprises, on a déploré notre incapacité à établir certains résultats importants soulevés par le problème n°2, au moins sans avoir recours à des hypothèses simplificatrices. En pareille situation, pratique qui devient de plus en plus courante dans la littérature, la spécification du modèle et le recours à une simulation numérique permettent de progresser et éclairent certains points laissés en suspens. C'est ce que nous nous proposons de faire maintenant.

1.3.1 - Spécification du modèle

Nous considérons la spécification suivante des fonctions :

$$f(g, G) = g^\rho \cdot (1 - a \cdot G^2), \quad (1.24)$$

$$u(C) = \frac{1}{1-\sigma} \cdot C^{1-\sigma}. \quad (1.25)$$

ρ définit l'élasticité de la production par rapport à la ressource. Par hypothèse, la production est croissante, à taux décroissant, en g . On doit donc avoir $0 < \rho < 1$. Posons $\rho = 0,05$.

Le dommage climatique est quadratique et proportionnel à la production. Il est égal à $g^\rho \cdot a \cdot G^2$. Le paramètre a mesure la part de la production perdue lorsque le stock de gaz à effet de serre vaut 1. On pose $a = 5 \cdot 10^{-4}$.

σ est l'élasticité de l'utilité marginale par rapport à la consommation. Ce paramètre représente l'aversion des agents économiques pour l'inégalité. Lorsqu'il vaut zéro : l'utilité de la consommation est linéaire ; toutes les unités de consommation sont considérées identiques, du point de vue de l'utilité qu'elles procurent ; les agents économiques sont aussi sensibles à la baisse de l'utilité des générations nanties qu'à la baisse de l'utilité des générations pauvres. Si σ est supérieure à zéro : les premières unités de consommation procurent une utilité plus grande que les dernières ; les agents économiques ont plus de regret à réduire l'utilité des générations pauvres que celle des générations favorisées. Nous utiliserons la valeur $\sigma = 0,75$.

Pour compléter notre spécification, nous proposons les valeurs suivantes pour le taux de recyclage du polluant et le taux d'actualisation respectivement : $\beta = 1/120$ et $\delta = 0,03$.

Remarque 1.5 : il aurait été plus simple d'utiliser une fonction d'utilité logarithmique. Toutefois, dans ce cas, le dommage de l'effet de serre et la production deviendraient indépendants, puisque $u(f(g, G)) = \rho \cdot \ln(g) + \ln(1 - a \cdot G^2)$. Ce faisant, on adopterait implicitement l'hypothèse de Farzin & Tahvonen (1996) et de Ulph & Ulph (1994), chose que l'on souhaite éviter.

Remarque 1.6 : le progrès technique peut facilement être introduit. Supposons que la frontière des possibilités de production s'élargisse, d'une période à l'autre, de n pour-cent. La fonction de production s'écrit alors $f(g, G, t) = g^\rho \cdot (1 - a \cdot G^2) \cdot e^{nt}$. S'il n'y a pas d'investissement,

l'utilité croît au taux exogène $n.(1-\sigma)$, puisque $u(C) = \frac{e^{n(1-\sigma)t}}{1-\sigma} \cdot [g^\rho \cdot (1-a.G^2)]^{1-\sigma}$. Une fois que l'on a constaté cela, la résolution consiste simplement à incorporer le facteur exogène au taux d'actualisation, i.e. $\delta' = \delta - n.(1-\sigma)$, et à suivre la même démarche que pour le cas général.

1.3.2 - Résolution

Les conditions d'optimalité (1.17), (1.18) et (1.19) s'écrivent ¹² :

$$\rho \cdot g^{\rho(1-\sigma)-1} \cdot (1-a.G^2)^{1-\sigma} = p + q, \quad (1.26)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p - \frac{2.a.G}{(1-a.G^2)^\sigma} \cdot g^{\rho(1-\sigma)}, \quad (1.27)$$

$$\dot{q} = \delta \cdot q. \quad (1.28)$$

En transformant la relation (1.26), on détermine la demande de ressources épuisables :

$$g(G, p + q) = \left[\frac{p + q}{\rho \cdot (1-a.G^2)^{1-\sigma}} \right]^{\frac{1}{\rho(1-\sigma)-1}}. \quad (1.29)$$

Elle dépend de son prix, d'une part, qui est la somme de la rente de rareté et de la taxe sur les émissions, et du niveau de pollution avéré, d'autre part. Elle vérifie le lemme 1.1.

De la même façon que pour construire le système (1.7), nous remplaçons g par la fonction de demande (1.29) dans (1.27), (1.15a) et (1.15b). Nous écrivons ainsi un système d'équations différentielles qui, en fonction des dotations initiales, va nous servir à déterminer les trajectoires suivies par l'économie.

¹² - Pour simplifier, le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d'épuisement est éliminé. Nous savons en effet que, du fait des propriétés de la fonction de production et de la fonction d'utilité, l'épuisement du stock de ressource est asymptotique et le multiplicateur est toujours nul.

Ce système est :

$$\begin{cases} \dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p - \frac{2 \cdot a \cdot G}{(1 - a \cdot G^2)^\sigma} \cdot g(G, p + q)^{\rho(1-\sigma)} \\ \dot{G} = g(G, p + q) - \beta \cdot G \\ \dot{q} = \delta \cdot q \\ \dot{S} = -g(G, p + q) \end{cases} \quad (1.30)$$

Les trajectoires sont calculées en utilisant le module de résolution de systèmes d'équations différentielles de MathCad 6.0. Au moyen d'une itération, nous corigeons les conditions initiales jusqu'à ce que les trajectoires déterminées vérifient les conditions de transversalité. En l'absence de contrainte d'épuisement, l'état terminal visé est l'état stationnaire, à l'intersection des isoclines $\dot{p} = 0$ et $\dot{G} = 0$. Avec contrainte d'épuisement, puisque la productivité marginale de la ressource tend vers l'infini lorsqu'elle est utilisée en quantités infinitésimales, la trajectoire solution produit un épuisement asymptotique de la ressource. D'autre part, puisque le dommage marginal finit par disparaître, le prix implicite de la pollution converge vers zéro à l'infini.

1.3.3 - Trajectoire sans contrainte d'épuisement

Si la ressource est disponible en quantités infinies, le système rejoint un équilibre stationnaire tel que l'émission et le stock de gaz à effet de serre sont constants. La relation (1.14) permet de trouver cet équilibre de long terme. Pour le cas présent, l'élasticité de la production par rapport à la ressource est égale à ρ . L'élasticité de la production par rapport à la pollution s'écrit :

$$e_G = -\frac{2 \cdot a \cdot G^2}{1 - a \cdot G^2}. \quad (1.31)$$

Suivant (1.14), l'équilibre stationnaire vérifie la propriété la propriété suivante :

$$\frac{\rho}{\beta} = \frac{1}{\delta + \beta} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot G^2}{1 - a \cdot G^2}. \quad (1.32)$$

La valeur stationnaire du stock de gaz à effet de serre s'écrit donc :

$$G_{\infty}^* = \left[a \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \beta}{\rho \cdot (\delta + \beta)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} = 14,362. \quad (1.33)$$

On en déduit les valeurs stationnaires de l'émission et du prix implicite de l'accumulation d'une unité de gaz supplémentaire :

$$g_{\infty}^* = \beta \cdot \left[a \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \beta}{\rho \cdot (\delta + \beta)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} = 0,119, \quad (1.34)$$

$$p_{\infty}^* = \frac{1}{(\delta + \beta)} \cdot \frac{2 \cdot a \cdot G_{\infty}^*}{(1 - a \cdot G_{\infty}^* \cdot 2)^{\sigma}} \cdot (\beta \cdot G_{\infty}^*)^{\rho(1-\sigma)} = 0,396. \quad (1.35)$$

Tableau 1.2 : Equilibres stationnaires pour différentes valeurs des paramètres

δ	β	Stock	Prix implicite	Consommation
0,01	0,005	11,812	0,817	0,808
0,01	0,010	9,759	0,498	0,848
0,01	0,020	8,502	0,288	0,882
0,03	0,005	17,259	0,562	0,753
0,03	0,010	13,484	0,362	0,822
0,03	0,020	10,847	0,226	0,872
0,05	0,005	20,770	0,468	0,700
0,05	0,010	16,151	0,303	0,794
0,05	0,020	12,685	0,194	0,859

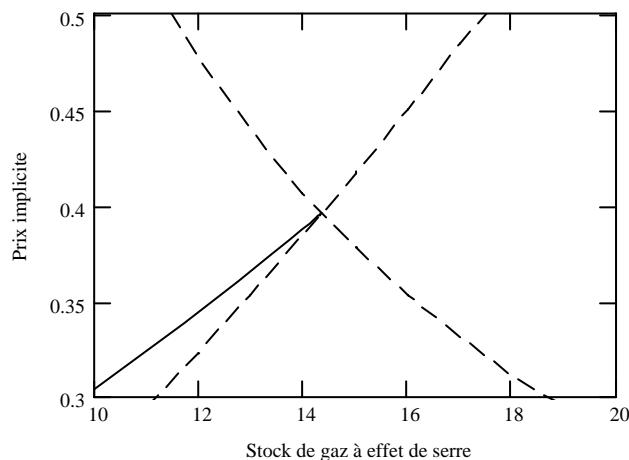
Le tableau 1.2 confirme la proposition 1.5. Il montre en effet que, plus le taux d'actualisation est élevé, plus la pollution stationnaire est importante et plus la consommation d'équilibre est faible. Bien entendu, le corollaire de ce résultat est que le prix implicite de la pollution décroît avec le taux d'actualisation.

L'influence du taux de recyclage du stock de gaz à effet de serre peut désormais être isolée (analytiquement, cet effet était ambigu). Lorsque le rythme de régénération de la pollution atmosphérique augmente, le stock de gaz à effet de serre stationnaire diminue et la consommation d'équilibre augmente. Ce résultat était prévisible. Si le taux de recyclage augmente, le même flux d'émission stabilise l'accumulation du polluant à un niveau plus

faible. En contrepartie, le dommage marginal et, par voie de conséquence, le prix implicite de la pollution diminuent. Il devient donc rentable d'augmenter le flux d'émission. L'équilibre est trouvé à un niveau intermédiaire garantissant une consommation plus importante.

Nous supposons que le stock de gaz à effet de serre d'origine est égal à 10 unités, i.e. $G_0 = 10$. La trajectoire optimale du système rejoint l'équilibre stationnaire calculé à l'instant (voir les relations (1.33) à (1.35)). Nous la représentons dans le graphique 1.2.

Graphique 1.2 : Trajectoire optimale sans contrainte d'épuisement



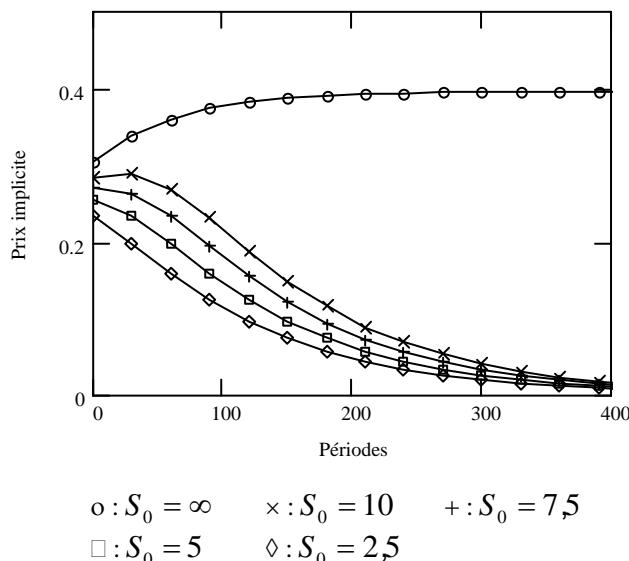
Le graphique 1.2 est le pendant du graphique 1.1 pour l'application numérique présente. On confirme les propriétés qualitatives de la trajectoire optimale : le prix implicite du polluant atmosphérique et le stock de gaz à effet de serre augmentent le long de cette trajectoire.

Remarque 1.7 : Avec progrès technique, l'équilibre stationnaire est en fait un sentier de croissance optimale. Le long de ce sentier, la production et le prix implicite de la pollution croissent au taux n ; l'émission et le stock de polluants sont constants.

1.3.4 - Prix implicite et contrainte d'épuisement

Ayant déterminé la trajectoire témoin, considérons maintenant l'effet de la contrainte d'épuisement sur la politique optimale du climat. La résolution repose sur les conditions terminales mises en évidence dans la section précédente. Premièrement, la rente de rareté q_0 est choisie de manière à produire un épuisement asymptotique de la ressource. Deuxièmement, le prix implicite du polluant doit tendre vers zéro à l'infini. La combinaison de ces deux propriétés détermine la trajectoire solution. Cette trajectoire est optimale puisqu'elle vérifie les conditions de transversalité (1.20) et (1.21).

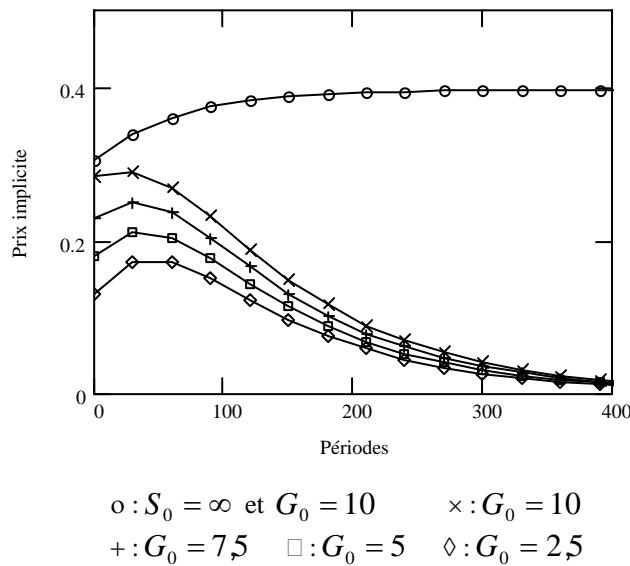
Graphique 1.3 : Prix implicite et dotation en ressources



Cette illustration numérique prouve que le prix implicite du polluant diminue lorsque la dotation en ressources diminue. Nous voyons deux explications à ce résultat. En premier lieu, puisque les émissions cumulées sont bornées supérieurement, les dommages encourus sont également limités et, surtout, inférieurs à ce qu'ils seraient sans contrainte d'épuisement. En second lieu, la diminution progressive de l'extraction réduit le niveau de production et, corrélativement, le dommage climatique, qui lui est proportionnel. Le graphique 1.3 permet de faire un autre constat. Si la ressource est abondante, la taxe optimale sur les émissions croît provisoirement avant de décroître jusqu'à zéro. Dans le cas contraire, le prix implicite du polluant est une fonction monotone décroissante du temps. Ces profils temporels sont à mettre

en perspective avec la trajectoire obtenue quand la ressource est disponible en quantités infinies, où le prix implicite croît de façon monotone.

Graphique 1.4 : Prix implicite et pollution d'origine



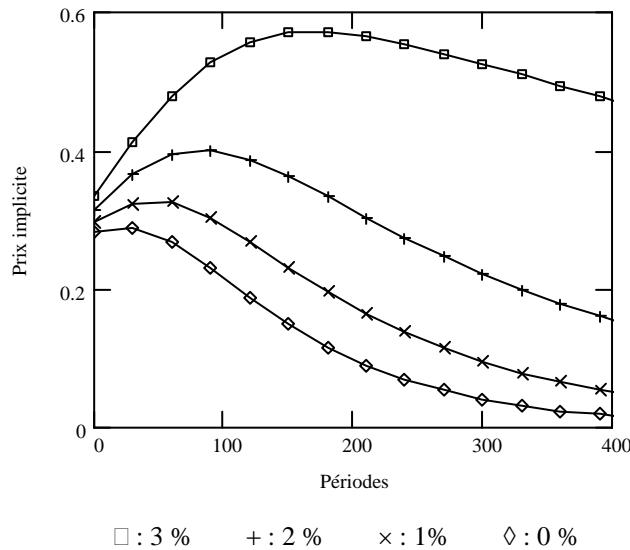
Dans le graphique 1.4, nous représentons les trajectoires du prix implicite pour différentes valeurs de G_0 (dans tous les cas, on a $S_0 = 10$, sauf pour la trajectoire témoin marquée d'un rond, pour laquelle $S_0 = \infty$). Il confirme la proposition de Farzin & Tahvonen (1996) et Ulph & Ulph (1994) selon laquelle, lorsque le taux de recyclage du polluant est constant, la taxe est provisoirement croissante si la pollution initiale est faible.

1.3.5 - Prix implicite et progrès technique exogène

En conclusion de la section 1.2, nous mettions en doute la pertinence d'une spécification où le dommage de la pollution ne serait pas proportionnel à la production. Une telle hypothèse implique que le dommage décroît irrémédiablement lorsque la pollution diminue, ce qui conditionne entièrement le profil du prix implicite de la pollution. Avec notre spécification, le dommage croît avec l'output ; la relation entre l'évolution de la pollution et celle de la taxe devient moins directe. Ainsi, une croissance forte de la production peut amplifier les dommages, même lorsque la pollution diminue. Pensant que ceci pourrait

remettre en question les résultats de Farzin & Tahvonen (1996), Sinclair (1994) et Ulph & Ulph (1994), un facteur exogène de progrès technique est incorporé à notre modèle.

Graphiques 1.5 : Prix implicite et progrès technique



Dans le graphique 1.5, la trajectoire marquée d'un losange est celle que l'on déterminait, dans les graphiques précédents, lorsque la dotation en ressources et le stock de polluants d'origine étaient égaux à 10 unités chacun. Les autres correspondent à la même situation de départ, avec différents taux de croissance exogènes.

On constate d'abord que le prix implicite de la pollution est plus élevé quand la croissance est forte. Cette influence de la croissance sur le prix implicite découle du fait que l'effet de serre est une pollution cumulative : si la pollution disparaissait immédiatement après son émission, le dommage de la dernière unité serait inchangé, qu'il y ait ou non croissance de la production.

Le profil temporel de la taxe sur les émissions reste qualitativement identique avec ou sans croissance. Le prix implicite croît provisoirement avant de diminuer jusqu'à zéro à l'infini. La croissance économique ne remet donc pas totalement en cause les propositions énoncées par Farzin & Tahvonen, Sinclair et Ulph & Ulph. Par contre, la croissance retarde sensiblement le point de retournement du prix implicite de la pollution : il se produit au bout de 20 périodes

lorsque la croissance est nulle, après 150 périodes lorsque le taux de croissance est égal à 3 pour-cent.

Ainsi, plusieurs raisons poussent à prétendre que, à l'horizon de planification débattu dans les rencontres internationales s'occupant de l'effet de serre, la taxe sur les émissions devrait croître progressivement avec le temps. En premier lieu, comme nous venons de le voir, il y a la croissance économique, qui amplifie les dommages futurs. En second lieu, les réserves d'énergies fossiles, principalement le charbon, sont suffisantes pour sextupler la concentration atmosphérique de gaz carbonique. Ceci fait que l'on se trouve plutôt dans le cas d'un stock de pollution réduit et d'une dotation en énergie relativement abondante. Or, nos résultats suggèrent que le prix implicite croît initialement précisément dans cette situation. Tous ces éléments incitent à penser que les résultats obtenus par Farzin & Tahvonen, Sinclair et Ulph & Ulph n'ont pas d'implications pratiques pour la préparation d'une politique internationale du climat.

1.4 - Conclusion

La théorie du contrôle optimal forme un cadre théorique approprié pour analyser le problème des pollutions cumulatives, telles que l'effet de serre. Deux raisons obligent à recourir à cette méthode. D'une part, contrairement aux pollutions classiques, où l'externalité est proportionnelle au flux d'émissions du polluant, les dommages climatiques dépendent du stock atmosphérique de gaz à effet de serre. D'autre part, le rythme de régénération de ce stock est lent, si bien que les émissions contemporaines modifieront le climat pendant une durée assez longue. Outre ces considérations techniques, le modèle de pollution cumulative, basé sur la théorie du contrôle optimal, a l'avantage de s'interpréter à partir des concepts habituels de l'économie de l'environnement. Ainsi, le multiplicateur associé à la contrainte d'accumulation, appelé variable adjointe, s'analyse comme un prix implicite ou un coût d'usage de la pollution. Il synthétise l'incidence future de l'accumulation des gaz à effet de serre.

Evidemment, comme dans les exemples de pollutions statiques, le fait que le “bien climat” soit un bien public pousse les agents économiques à lui attribuer une valeur nulle et, par voie de conséquence, à polluer de manière excessive. L’optimum social n’est donc rejoint que si le prix implicite de la pollution est imposé de manière autoritaire aux “usagers”. Un moyen pour parvenir à ce résultat consiste à lever une taxe pigovienne, calquée sur le prix implicite de la pollution. Les décisions décentralisées des agents économiques suivent alors les recommandations du modèle intertemporel et l’accumulation des gaz à effet de serre se fait à un rythme optimum.

Dans l’environnement économique convexe de ce chapitre, la dynamique optimale de la pollution rejoint un état stationnaire unique. L’émission est alors égale au recyclage naturel des gaz à effet de serre accumulés dans l’atmosphère et il se produit une stabilisation du climat. Ce niveau de pollution égalise la productivité marginale de l’émission au dommage marginal intertemporel de l’effet de serre. L’équilibre de long terme est très sensible à plusieurs paramètres du modèle. Notamment, un facteur d’actualisation élevé accroît la pollution stationnaire et réduit la consommation stationnaire. Un taux de recyclage élevé des gaz à effet de serre accumulés produit une baisse de la pollution stationnaire et un accroissement de la consommation stationnaire.

La dynamique transitoire optimale consiste à rejoindre asymptotiquement l’équilibre stationnaire. En partant d’un stock d’origine plus faible que son niveau d’équilibre, l’émission et la consommation diminuent le long du sentier optimal, pendant que la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre et le prix implicite de la pollution augmentent.

La combustion des énergies fossiles est la principale source d’émission de gaz à effet de serre. Ce constat amène à penser que le problème du renforcement de l’effet de serre se réglera naturellement, par suite de l’épuisement de ces ressources. Ce raisonnement est en fait simpliste. Malgré cela, l’interaction entre ces deux dynamiques entremêlées mérite d’être analysée.

Les travaux consacrés à cette question concluent que la trajectoire optimale du prix implicite de la pollution devrait décroître, ce qui contredit le modèle de pollution cumulative simple. Ce résultat s'explique fort simplement par la décroissance inévitable du stock de gaz à effet de serre, consécutif au renchérissement progressif des énergies fossiles.

Les simulations numériques de ce chapitre contredisent partiellement cette proposition. Plusieurs facteurs suggèrent, au contraire, que le prix implicite de la pollution doit croître pendant une période assez longue avant de diminuer progressivement. La persistance des gaz à effet de serre fait que l'épuisement des énergies fossiles ne réduira les tensions climatiques que tardivement. De plus, le rapport des quantités de carbone accumulé dans l'atmosphère et stocké sous forme de combustibles fossiles reste assez faible. Enfin, si l'effet de serre est une externalité contre-productive, la baisse tendancielle des dommages, consécutive à la réduction du stock de gaz à effet de serre, est contrecarrée par la croissance économique.

Les études appliquées conçues pour quantifier les coûts et les avantages d'une politique climatique, auxquelles nous allons consacrer les deux prochains chapitres, s'appuient sur des notions qui n'ont pas été abordées ici. En guise de conclusion du présent chapitre, nous corrigons cette lacune et présentons une méthode d'évaluation basée sur le problème n°1. Le point de départ consiste à définir une trajectoire de référence pour étalonner les évaluations. Le scénario de politique inchangée, consistant à ne jamais rien entreprendre pour lutter contre l'effet de serre, est le candidat naturel pour tenir ce rôle. Il s'obtient en posant que le prix de l'émission des gaz à effet de serre est nul à toute date. Il produit une trajectoire d'émission $g_{pi}(t)$, telle que $f_g(g_{pi}, G) \cdot u'(f(g_{pi}, G)) = 0, \forall t$, et une trajectoire d'accumulation des gaz à effet de serre correspondante $G_{pi}(t)$. Partant de là, les gains de la lutte contre l'effet de serre se mesurent facilement, par comparaison de la trajectoire optimale $(G^*(t), g^*(t))$ à la trajectoire de politique inchangée $(G_{pi}(t), g_{pi}(t))$, en utilisant l'intégrale (1.1).

La méthodologie du paragraphe précédent néglige les difficultés posées, dans la pratique, par la recherche de la fonction $f(g, G)$. Pour simplifier, la littérature économique sur le sujet a décomposé le problème.

Dans le chapitre 2, nous verrons que les modèles d'équilibre général appliqués ne tiennent pas compte des dommages climatiques. Leur rôle se limite à déterminer l'effet sur l'économie de mesures exogènes de restriction des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, si $g(t)$ définit la trajectoire d'émission imposée, ces modèles déterminent :

1. le coût économique du quota d'émission $u(f(g_{pi}(t),0)) - u(f(g(t),0))$;
2. la mesure fiscale $f_g(g(t),0)$ nécessaire pour contraindre les agents économiques à le respecter.

Dans le chapitre 3, nous passerons en revue les études traitant de l'évaluation des dommages climatiques. Elles se réfèrent également à la trajectoire de politique inchangée et comparent la situation idéale, où le stock de gaz à effet de serre serait à son niveau naturel tout le temps, à la situation réelle, où le stock de gaz à effet de serre est à son niveau projeté. Elles déterminent :

1. les dommages climatiques $u(f(g_{pi}(t),G_{pi}(t))) - u(f(g_{pi}(t),0))$;
2. le dommage marginal de l'effet de serre $f_G(g_{pi}(t),G_{pi}(t))$.

Annexe 1.1 : Concavité de la fonction de production

La fonction de production s'écrit $f(g, G) = F(g, \xi(G))$. Sa matrice hessienne est :

$$h = \begin{pmatrix} f_{gg} & f_{gG} \\ f_{Gg} & f_{GG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{gg} & \xi'(G) \cdot F_{g\Delta T} \\ \xi'(G) \cdot F_{\Delta Tg} & \xi''(G) \cdot F_{\Delta T} + \xi'(G)^2 \cdot F_{\Delta T \Delta T} \end{pmatrix}$$

$f(g, G)$ est concave si sa matrice hessienne est semi-définie négative, i.e. si $f_{gg} \leq 0$ et si $f_{gg} \cdot f_{GG} - (f_{gG})^2 \geq 0$. La première condition est remplie puisque $f_{gg} = F_{gg} < 0$. De plus,

$$f_{gg} \cdot f_{GG} - (f_{gG})^2 = \xi'(G)^2 \cdot \left(F_{gg} \cdot F_{\Delta T \Delta T} - (F_{\Delta Tg})^2 \right) + \xi''(G) \cdot F_{gg} \cdot F_{\Delta T} > 0,$$

puisque $F_{gg} \cdot F_{\Delta T \Delta T} - (F_{\Delta Tg})^2 \geq 0$ et puisque $\xi''(G) \cdot F_{gg} \cdot F_{\Delta T} > 0$. $f(g, G)$ est donc strictement concave.

Annexe 1.2 : Conditions suffisantes d'optimalité

Par application du théorème 2 et de son corollaire (voir l'appendice 1), les conditions nécessaires d'optimalité sont suffisantes si le hamiltonien est concave, autrement dit, puisque l'équation différentielle (1.1a) est linéaire, si la fonction $u(f(g, G))$ est concave. La matrice hessienne de $\tilde{H}(G, g, p, t)$ s'écrit :

$$h = \begin{pmatrix} \tilde{H}_{gg} & \tilde{H}_{gG} \\ \tilde{H}_{Gg} & \tilde{H}_{GG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{gg} \cdot u' + f_g^2 \cdot u'' & f_{gG} \cdot u' + f_g \cdot f_G \cdot u'' \\ f_{Gg} \cdot u' + f_G \cdot f_g \cdot u'' & f_{GG} \cdot u' + f_G^2 \cdot u'' \end{pmatrix}$$

Le Hamiltonien et la fonction $u(f(g, G))$ sont concaves si la matrice hessienne est semi-définie négative, i.e. si $\tilde{H}_{gg} < 0$ et si $\tilde{H}_{gg} \cdot \tilde{H}_{GG} - (\tilde{H}_{gG})^2 \geq 0$.

La première condition est vérifiée d'emblée. Pour établir la seconde propriété, calculons le déterminant de la matrice hessienne :

$$\begin{aligned}\tilde{H}_{gg} \cdot \tilde{H}_{GG} - \left(\tilde{H}_{gG}\right)^2 &= \left(f_{gg} \cdot f_{GG} - f_{gG}^2\right) \cdot (u')^2 \\ &\quad + \left(f_{gg} \cdot f_G^2 + f_g^2 \cdot f_{GG} - 2 \cdot f_g \cdot f_G \cdot f_{gG}\right) \cdot u' \cdot u''\end{aligned}$$

Le premier terme est strictement positif puisque la fonction $f(g, G)$ est strictement concave.

Le dernier terme est strictement positif compte tenu des propriétés de $f(g, G)$ et de $u(C)$. On en conclut que la deuxième condition est remplie et que la fonction hamiltonienne est strictement concave.

Remarque : $\tilde{H}_{gG} = \frac{d(f_g \cdot u')}{dG} = \frac{d(f_g)}{dG} \cdot u' + f_g \cdot \frac{d(u')}{dG}$ mesure la variation de la productivité marginale de l'émission en terme d'utilité suite à une variation du stock de gaz à effet de serre. Cette variation est l'addition de deux effets de sens opposés :

1. l'effet $d(f_g)/dG \leq 0$ résulte de la baisse mécanique de la productivité marginale physique de l'émission lorsque l'effet de serre s'accroît ;
2. l'effet $f_g \cdot u'' \geq 0$ s'explique par l'accroissement de l'utilité marginale résultant de la chute de la consommation lorsque l'effet de serre s'amplifie.

Hypothèse : nous supposons que $\tilde{H}_{gG} \leq 0$, i.e. que la productivité marginale du polluant, exprimée en termes d'utilité, est une fonction décroissante de la pollution et, corolairement, que le dommage marginal en termes d'utilité de l'effet de serre est une fonction croissante de la production.

Annexe 1.3 : Démonstration du lemme 1.1

Puisque (1.3a) est vérifiée quels que soient G et p , on a :

$$d\tilde{H}_g = \tilde{H}_{gg} \cdot dg + \tilde{H}_{gG} \cdot dG - dp = 0.$$

On en déduit (se reporter à l'hypothèse de l'annexe 1.2 pour démontrer la première) :

$$\frac{dg(G,p)}{dG} = -\frac{\tilde{H}_{gG}}{\tilde{H}_{gg}} \leq 0,$$

$$\frac{dg(G,p)}{dp} = \frac{1}{\tilde{H}_{gg}} < 0.$$

Annexe 1.4 : Démonstration de la propriété 1.1.

Nous résolvons l'équation différentielle du système (1.4) :

$$\begin{aligned} \dot{p} - (\delta + \beta) \cdot p &= f_G(g, G) \cdot u'(f(g, G)) \\ \Leftrightarrow \left[e^{-(\delta + \beta) \cdot \tau} \cdot p \right]_t^\infty &= \int_t^\infty e^{-(\delta + \beta) \cdot \tau} \cdot f_G(g, G) \cdot u'(f(g, G)) d\tau \\ \Leftrightarrow p(t) &= - \int_t^\infty e^{-(\delta + \beta) \cdot (\tau - t)} \cdot f_G(g, G) \cdot u'(f(g, G)) d\tau \end{aligned}$$

sachant que $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p(t) = 0$.

Annexe 1.5 : Démonstration de (1.10)

La première étape de la démonstration applique le principe d'optimalité de Bellman :

$$V(G^*(t), t) = \max_{g(t)} \left[\int_t^{t+\Delta t} e^{-\delta \tau} \cdot u(C(\tau)) d\tau + V(G^*(t + \Delta t), t + \Delta t) \right].$$

Si Δt est suffisamment petit, on peut approximer la relation précédente par son développement de Taylor :

$$V(G^*(t), t) = \max_{g(t)} \left[e^{-\delta \tau} \cdot u(C(t)) \cdot \Delta t + V(G^*(t + \Delta t), t + \Delta t) \right] + o(\Delta t),$$

$$\text{où } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0.$$

En supposant que la fonction V soit dérivable, on peut également calculer le développement de Taylor de $V(G^*(t + \Delta t), t + \Delta t)$:

$$V(G^*(t + \Delta t), t + \Delta t) = V(G^*(t), t) + V_G(G^*(t), t) \cdot \Delta G + V_t(G^*(t), t) \cdot \Delta t + o(\Delta t).$$

En introduisant ce résultat dans la relation précédente, on en déduit que :

$$0 = \max_{g(t)} \left[e^{-\delta \tau} \cdot u(C(t)) \cdot \Delta t + V_G(G^*(t), t) \cdot \Delta G + V_t(G^*(t), t) \cdot \Delta t \right] + o(\Delta t).$$

Il suffit maintenant de diviser par Δt et de choisir $\Delta t \rightarrow 0$ pour obtenir l'équation Hamilton-Jacobi-Bellman :

$$0 = \max_{g(t)} \left[e^{-\delta \tau} \cdot u(C(t)) + V_G(G^*(t), t) \cdot \dot{G} + V_t(G^*(t), t) \right].$$

La seconde partie de la démonstration utilise les deux résultats suivants :

$$V_t(G^*(t), t) = -\delta \cdot e^{-\delta t} \cdot V(G^*(t), 0) \text{ (voir la relation (1.9))} ;$$

$$V_G(G^*(t), t) = -e^{-\delta t} \cdot p^*(t) \text{ (voir l'appendice 2).}$$

En remplaçant dans l'équation Hamilton-Jacobi-Bellman et en simplifiant, on obtient :

$$\delta \cdot V(G^*(t), 0) = \max_{g(t)} \left[u(C(t)) - p^*(t) \cdot \dot{G} \right].$$

Le terme entre crochets n'est rien d'autre que le hamiltonien courant, ce qui prouve (1.10).

Annexe 1.6 : Propriétés des isoclines.

Le long des isoclines, les propriétés suivantes sont vérifiées.

$$dp = \left[\delta + \beta + (f_{Gg}u' + f_G f_g u'') \cdot g_p \right] dp + \left[(f_{Gg}u' + f_G f_g u'') \cdot g_G + (f_{Gg}u' + f_g^2 u'') \right] dG = 0,$$

$$d\dot{G} = g_p \cdot dp + (g_G - \beta) \cdot dG = 0,$$

où g_i est la dérivée partielle de la demande d'émission par rapport à i .

La courbe représentant \mathbf{P} a une pente non décroissante (voir l'annexe 1.2) :

$$\frac{dp}{dG} \Big/ \dot{p} = 0 = - \frac{\tilde{H}_{gg} \cdot \tilde{H}_{GG} - (\tilde{H}_{gG})^2}{(\delta + \beta) \cdot \tilde{H}_{gg} + \tilde{H}_{gG}} \geq 0.$$

La courbe représentant \mathbf{G} est de pente non croissante :

$$\frac{dp}{dG} \Big/ \dot{G} = 0 = \beta \cdot \tilde{H}_{gg} + \tilde{H}_{gG} \leq 0.$$

En utilisant les différentielles totales ci-dessus, on constate que tout point au-dessus de \mathbf{P} a une vitesse \dot{p} positive (et inversement), puisque :

$$\frac{dp}{dp} = \delta + \beta + \frac{\tilde{H}_{gG}}{\tilde{H}_{gg}} \geq 0,$$

et que tout point au-dessus de \mathbf{G} a une vitesse \dot{G} négative (et inversement), puisque :

$$\frac{d\dot{G}}{dp} = \frac{1}{\tilde{H}_{gg}} \leq 0.$$

Annexe 1.7 : Démonstration de la propriété 1.5

En combinant les relations (1.11), (1.12) et (1.13), on définit la fonction :

$$A(G) = (\delta + \beta) \cdot f_g(\beta \cdot G, G) + f_G(\beta \cdot G, G).$$

On démontre que cette fonction décroît avec G :

$$A'(G) = (\delta + \beta) \cdot (\beta \cdot f_{gg} + f_{gG}) + (\beta \cdot f_{Gg} + f_{GG}) < 0.$$

L'équilibre stationnaire du système (1.7) est tel que $A(G_\infty^*) = 0$. Supposons que le taux d'actualisation augmente de $d\delta$. On a alors $A(G_\infty^*) = f_g(\beta \cdot G_\infty^*, G_\infty^*) \cdot d\delta > 0$ et la pollution G_∞^* ne respecte plus les conditions de stationnarité. Une variation de dG_∞^* telle que $A'(G_\infty^*) \cdot dG_\infty^* + f_g(\beta \cdot G_\infty^*, G_\infty^*) \cdot d\delta = 0$ permet alors de retrouver l'état stationnaire à partir du point G_∞^* . Il s'ensuit que :

$$\frac{dG_\infty^*}{d\delta} = -\frac{f_g(\beta \cdot G_\infty^*, G_\infty^*)}{A'(G_\infty^*)} > 0,$$

$$\frac{dg_\infty^*}{d\delta} = -\frac{\beta \cdot f_g(\beta \cdot G_\infty^*, G_\infty^*)}{A'(G_\infty^*)} > 0.$$

Ceci démontre la première partie de la propriété.

Le niveau de production stationnaire dépend de la pollution uniquement, i.e. $Q_\infty^* = f(\beta \cdot G_\infty^*, G_\infty^*)$. L'effet d'une variation infinitésimale de G_∞^* dépend du signe de l'expression suivante :

$$dQ_\infty^* = (\beta \cdot f_g + f_G) \cdot dG_\infty^*.$$

Or, $(\delta + \beta) \cdot f_g + f_G = 0$ à l'équilibre stationnaire. Il s'ensuit que $\beta \cdot f_g + f_G = -\delta \cdot f_g < 0$. On en déduit que la consommation stationnaire décroît avec la pollution stationnaire.

Ceci démontre la deuxième partie de la propriété.

Annexe 1.8 : Conditions suffisantes d'optimalité du problème n°2

Puisque les équations différentielles (1.15a) et (1.15b) et la contrainte de non-négativité de S sont linéaires, le hamiltonien est (strictement) concave si $u(f(g,G))$ est (strictement) concave (voir le corollaire du théorème 2 de l'appendice 1). Il a déjà été prouvé dans l'annexe 1.2 que la fonction $u(f(g,G))$ possédait cette propriété. Du fait du théorème 2 de l'appendice 1, on en déduit que les conditions nécessaires (1.17) à (1.21) sont également conditions suffisantes.

Chapitre 2

Coût de la lutte contre l'effet de serre

Le coût d'une politique du climat se définit comme la quantité de bien-être que les agents économiques doivent sacrifier pour ralentir le réchauffement planétaire, indépendamment des avantages afférents. Les modèles mondiaux partent de cette définition (Barns & alli, 1993 ; Manne, 1993 ; Oliveira-Martins & alli, 1993 ; Rutherford, 1993). Cette définition est certes pratique, l'exercice d'évaluation des coûts étant suffisamment compliqué en soi, mais elle est incomplète. L'idéal serait de mesurer le coût net de la politique, en retranchant les dommages climatiques évités. Cela sera l'objet du prochain chapitre.

Une politique climatique réunit un éventail de mesures concrètes, comme par exemple la gestion des forêts, la réduction de la consommation d'énergies fossiles, etc... Avant de nous engager dans le débat de fond, nous consacrerons une première section à la présentation de ces actions et nous exposerons les raisons qui conduisent à privilégier la réduction des émissions de dioxyde de carbone.

La lutte contre l'effet de serre s'entend dans la durée. En général, les modèles mondiaux planifient des scénarios de dépollution sur un horizon d'un siècle, ce qui complique singulièrement les choses. Puisque la production et les émissions de gaz à effet de serre futures sont des inconnues, il faut les prévoir pour obtenir une situation de référence qui étalonnera l'évaluation du coût. Du fait de l'influence de cette trajectoire de politique inchangée ("business-as-usual" en anglais) sur le résultat final, nous avons jugé important d'expliquer, dans les sections 2 et 3, comment les modèles mondiaux construisent leurs prévisions des émissions de gaz à effet de serre. Dans un premier temps, nous dégagerons les déterminants économiques principaux de la demande d'énergie, en nous appuyant sur les tendances passées et sur une analyse économique de la production. Pour finir, nous montrerons comment passer de la consommation d'énergie à une projection des émissions de carbone.

Les projections, issues du scénario de politique inchangée, servent de base à l'évaluation des coûts des politiques climatiques. Dans les modèles mondiaux, ces dernières prennent la forme d'un quota d'émission ad hoc. Partant de là, les modèles d'équilibre général appliquent calculent la trajectoire associée à cette contrainte exogène, puis le coût économique de la politique, défini par comparaison avec le scénario de politique inchangée.

Dans la quatrième section, nous résumerons les résultats de deux modèles mondiaux pour tirer les enseignements principaux qui s'en dégagent. L'initiative de l'O.C.D.E., invitant les chercheurs à standardiser les hypothèses et les politiques testées, facilitera grandement la comparaison des modèles.

2.1 - Des moyens d'action multiples

Pour infléchir un éventuel réchauffement climatique, il faut agir sur la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre, soit indirectement, en intervenant sur les comportements responsables de leur accumulation, soit directement, en renforçant les réservoirs naturels et les puits, pour éliminer les gaz à effet de serre accumulés.

La politique du climat peut avoir de multiples composantes ; les principales sont énumérées dans l'encadré 2.1. En théorie, toutes devraient être utilisées dans des proportions telles que leurs rendements marginaux s'égalisent.

Encadré 2.1 : Typologie des mesures de lutte contre l'effet de serre

1) Méthodes indirectes :

- a) Réduire la consommation d'énergie ;
- b) Limiter les émissions par unité de consommation ou de P.I.B. :
 - i) en favorisant les substitutions interénergétiques ;
 - ii) en filtrant les émissions ;
 - iii) en éliminant les Chlorofluorocarbones.
- c) Empêcher la déforestation.

2) Méthodes directes :

- a) Favoriser la reforestation ;
- b) Recourir à l'« Ingénierie climatique ».

Inspiré de Nordhaus (1991a)

La gestion des forêts intervient comme mesure directe et/ou indirecte. Le déboisement produit, chaque année, une émission de $1,6 \pm 1$ GtC. Cline (1994) estime qu'une politique de ralentissement de la déforestation coûterait environ 6 dollars par tonne de carbone économisé, ce qui est relativement faible par rapport aux mesures alternatives. Malheureusement, une baisse du déboisement de 50 pour-cent réduirait les émissions mondiales de dioxyde de carbone de seulement 10 pour-cent. Cette politique ne peut donc être qu'une mesure d'accompagnement. Le reboisement est une action moins prometteuse. En effet, outre le surcoût lié à la plantation des arbres, les usages concurrents du sol (agriculture et habitation) rendent cette politique moins rentable. En comptabilisant ces facteurs, le coût du reboisement atteint entre 15 et 20 dollars par tonne de carbone emprisonnée (Cline, 1994). Une autre contrainte vient limiter l'intérêt du reboisement : la période pendant laquelle une forêt emmagasine le dioxyde de carbone ne dépasse pas 30 ans.

Les solutions techniques de l'ingénierie climatique ont, pour ainsi dire, été totalement laissées de côté par la littérature économique. A notre connaissance, seul Nordhaus (1992a) et (1992b) les étudie, en insistant toutefois sur le fait qu'elles ne sont pas encore opérationnelles. Au passage, il convient de noter qu'elles pourraient être sources d'autres risques environnementaux majeurs.

Les économistes ont également délaissé l'étude de la réduction des émissions des chlorofluorocarbures. Cette attitude s'explique simplement par la ratification, en 1992, du protocole de Montréal, qui arrête un calendrier conduisant à leur disparition complète d'ici à l'an 2000.

Les arguments précédents, combinés au fait que le gaz carbonique est le principal responsable du renforcement de l'effet de serre, justifient que la littérature économique sur l'évaluation des coûts de la politique du climat se soit intéressée, quasi exclusivement, à la réduction des émissions de dioxyde de carbone. Comme les émissions de dioxyde de carbone sont étroitement corrélées à la consommation des énergies fossiles, l'analyse du coût de la

politique du climat s'inscrit alors dans la continuité des questions plus anciennes traitant du coût économique des économies d'énergie.

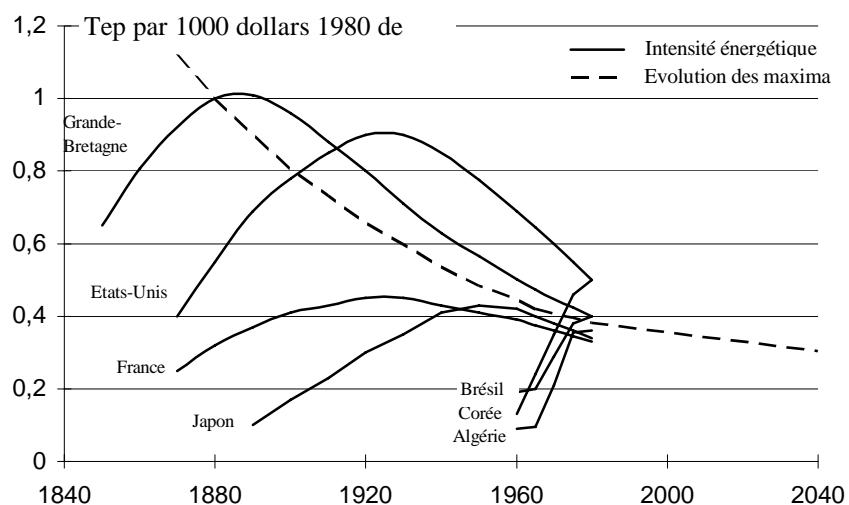
2.2 - La consommation d'énergie finale

Dans cette section, nous dégagerons les déterminants principaux de la demande d'énergie. Cette discussion servira, plus loin, à comprendre comment les modèles mondiaux obtiennent une projection des émissions de dioxyde de carbone sur le prochain siècle.

2.2.1 - Historique de la consommation d'énergie

Avant la révolution industrielle, l'énergie satisfaisait surtout des besoins domestiques mais n'intervenait pas significativement dans l'activité de production. Avec le décollage industriel, l'énergie devient un facteur de production, au même titre que le travail et le capital ; la consommation d'énergie par habitant augmente continûment depuis lors. Toutefois, Percebois (1995) distingue deux phases caractéristiques, à partir de 1850, concernant les énergies commerciales : voir le graphique 2.1.

Graphique 2.1 : Evolution de l'intensité énergétique du P.I.B.



Source : Dessus (1996)

La première époque se définit par une hausse continue de l'intensité énergétique de la production des pays occidentaux, c'est-à-dire de la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir

un dollar de P.I.B. constant. Selon les pays, ce mouvement cesse entre 1880 et 1970. Il résulte principalement d'un effet de structure, c'est-à-dire de l'accroissement du poids de l'industrie lourde dans la production. Cette tendance est caractéristique du décollage industriel et mérite d'être soulignée. Toutefois, selon certaines estimations, l'intensité énergétique du P.I.B. diminuerait, en fait, pendant cette période si l'on tient compte des énergies non commerciales (le bois et le charbon de bois).

La seconde période connaît une baisse constante de l'intensité énergétique de la production. Cette nouvelle tendance aurait trois causes principales. L'évolution technologique, qui se traduit par une amélioration du rendement énergétique réel (un progrès technique intensif en énergie) et apparent (un progrès technique neutre), serait le facteur principal. Les substitutions interénergétiques y auraient également contribué pour une large part (principalement, le remplacement du charbon par l'électricité et le pétrole). Enfin, l'effet de structure jouerait dans le sens inverse par rapport à la période précédente, avec la "tertiairisation" des économies développées.

On retient donc que « l'intensité énergétique du P.I.B. a décrû de façon tendancielle depuis le milieu du XIXème siècle dès lors que l'on tient compte de l'énergie non commerciale » (Percebois, 1995). L'énergie est donc utilisée de plus en plus efficacement par les sociétés à mesure que le temps passe. Souvenons-nous, également, que le schéma décrit caractérise la situation des pays développés. Ainsi, à condition que les pays en développement suivent un schéma semblable, il faut s'attendre à ce que leur développement s'accompagne d'une élévation sensible de l'intensité énergétique de leur P.I.B., donc d'une aggravation sensible de l'effet de serre.

2.2.2 - Les déterminants de la demande d'énergie

Au niveau macro-économique, l'énergie joue un double rôle : en tant que bien de consommation, elle satisfait des besoins comme le chauffage et le transport ; en tant que facteur de production, elle contribue à la production des autres biens de consommation.

Laissant de côté son premier emploi, la demande d'énergie se détermine comme la demande des autres inputs ; elle est un sous-produit des fonctions de production (Percebois, 1995). A l'instar de la plupart des modèles d'équilibre général, supposons qu'une fonction de production C.E.S. est une bonne représentation du domaine des possibilités de production agrégée de l'économie (ou d'une branche). Le bien est produit en combinant deux facteurs de production, l'énergie finale E , d'une part, qui est offerte par la branche énergétique, et le capital efficace K , d'autre part, qui est une combinaison optimale de capital et de travail :

$$Y = \left(a.(T.E)^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + b.K^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}. \quad (2.1)$$

où

a et b sont des paramètres de dimension,

T est un facteur de progrès technique intensif en énergie,

ε est l'élasticité de substitution entre les deux facteurs, avec $0 < \varepsilon < \infty$.

A l'optimum du producteur, l'énergie est rémunérée à sa productivité marginale. On en déduit la fonction de demande d'énergie suivante :

$$E = a^{\varepsilon} \cdot p^{-\varepsilon} \cdot T^{\varepsilon-1} \cdot Y. \quad (2.2)$$

où p est le prix relatif de l'énergie (autrement dit, le bien produit est numéraire).

La relation (2.2) met en évidence quatre déterminants de la demande d'énergie. A en croire cette expression, une projection fondée de la consommation énergétique future nécessite la connaissance des évolutions temporelles de la production, du prix de l'énergie finale, du progrès technique non neutre et de l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres facteurs de production.

2.2.2.1 - Projection de la production

La croissance de la production dépend de deux tendances exogènes, la démographie et le progrès technique neutre, et d'une composante endogène, l'accumulation du capital.

Pour faciliter la tâche des chercheurs et la comparaison des résultats des diverses équipes, l'E.M.F. n°12 (Groupe de travail sur la modélisation de l'énergie, commandité par l'O.C.D.E. et l'A.I.E) propose des projections cibles concernant la population et la production de plusieurs régions du monde. Ces données sont regroupées dans l'annexe 2.1.

2.2.2.2 - Le prix de l'énergie

L'énergie finale est offerte par la branche énergétique de l'économie. Sa production se fait par transformation des énergies primaires, qui sont le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'électricité primaire (principalement, hydraulique et nucléaire ; marginalement, éolienne et solaire), en énergie utile. L'évolution du prix de l'énergie finale résultera d'une interaction complexe entre les offres potentielles des énergies primaires et les possibilités de substitutions interénergétiques.

L'offre des énergies fossiles (le pétrole, le gaz naturel et le charbon, dans une moindre mesure) devrait diminuer au cours du prochain siècle. Si le rythme d'extraction de chacune de ces ressources restait constant au cours des années à venir, les réserves prouvées de pétrole seraient épuisées dans 43,1 ans, celles de gaz naturel dans 64,8 ans et celles de charbon dans 232 ans (Source : British Petroleum, 1993). Ces contraintes devraient créer des tensions à la hausse sur le prix de l'énergie finale au cours des décennies prochaines.

Cette tendance devrait être partiellement atténuée par l'augmentation de l'offre d'électricité primaire, d'une part, et par l'invention et la commercialisation de nouvelles formes d'énergies primaires, d'autre part.

La substitution de l'électricité aux énergies fossiles risque d'être insuffisante pour contrecarrer la progression du prix de l'énergie finale pour deux raisons. La première est que l'offre d'électricité primaire est elle-même limitée : le cas de la France mis à part, les programmes de production d'électricité nucléaire sont stoppés dans de nombreux pays ; les sites capables de recevoir des centrales hydrauliques sont évidemment en nombre limité ; les énergies éolienne et solaire sont coûteuses. L'autre raison est que les énergies fossiles et

l'électricité sont imparfairement substituables (principalement à cause du transport : le moteur électrique reste nettement moins performant que le moteur à explosion : autonomie, vitesse ...).

L'autre issue à l'inflation prévisible du prix de l'énergie finale réside dans le développement de technologies de rechange (technologies “back-stop” en anglais). Trois propriétés les définissent :

1. elles proposent un substitut parfait à une technologie existante ;
2. leur coût de production marginal est constant ;
3. leur offre est infiniment élastique à ce prix.

Dans le cas des énergies fossiles, il existe deux technologies de rechange principales. L'une est à base de carbone ; il s'agit des combustibles synthétiques. L'autre, l'hydrogène liquide obtenu par électrolyse, ne contient pas de carbone.

L'E.M.F. n°12 recommande aux concepteurs des modèles globaux de modéliser explicitement ces substituts. Ceux qui le font partent des mêmes hypothèses concernant leur date d'apparition et leur coût de production. Les propriétés des technologies de rechange, i.e. une offre potentiellement très grande, au-delà d'un prix plancher, et une substituabilité infinie avec les énergies fossiles, impliquent que le prix de l'énergie finale ne peut pas dépasser une certaine valeur.

Toutefois, puisque ces technologies seront opérationnelles dans quelques décennies seulement, à un coût de production deux à quatre fois plus grand que celui des technologies traditionnelles, elles n'empêcheront pas la hausse du prix de l'énergie dans un premier temps (à moins d'un effort de recherche accélérant leur commercialisation et réduisant leur coût de production).

2.2.2.3 - Amélioration du rendement énergétique

Le progrès technique intensif en énergie est un déterminant très important de l'évolution de la consommation énergétique à l'échelle séculaire. Compte tenu de la relation

(2.2), si l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres facteurs est inférieure à l'unité (ce que supposent tous les modèles d'équilibre général appliqué), la présence d'un progrès intensif en énergie réduit la consommation future d'énergie finale.

Dans les modèles mondiaux, l'amélioration de l'efficacité énergétique est déterminée par prolongement des tendances de long terme. Dans notre présentation historique, nous montrions que le P.I.B. a augmenté plus vite que la consommation d'énergie depuis 1850. Au vu de la relation (2.2), ceci provient de l'évolution combinée du prix de l'énergie, du progrès technique neutre et du progrès technique intensif en énergie sur la période.

Selon les estimations de Nordhaus (1974), les prix réels du pétrole et du charbon, mesurés en termes de travail, auraient diminué au cours de notre siècle : indice 1034 en 1900, base 100 en 1970, pour le pétrole et indice 459 en 1900, base 100 en 1970, pour le charbon. Krutilla (1968, p.777), en se basant sur plusieurs études consacrées à ce sujet, parvient à la même conclusion : « Une étude systématique de l'évolution des prix des ressources naturelles n'a révélé aucune interruption durable de leur déclin par rapport aux autres biens et services .»¹. A condition que ces mesures reflètent, au moins en partie, l'évolution du prix réel de l'énergie finale, on peut conclure que la baisse de l'intensité énergétique du P.I.B. observée provient de l'amélioration des rendements uniquement, pas d'un effet prix.

Il reste à savoir si l'augmentation du rendement énergétique est apparente, réelle, ou bien les deux à la fois. Les séries temporelles ne répondent pas à cette question, mais le bon sens plaide en faveur de l'existence d'un progrès intensif en énergie. La liste des progrès réalisés dans l'ensemble des équipements de la vie quotidienne est suffisamment longue pour s'en convaincre. Contentons-nous simplement des quelques exemples parlants proposés par Dessus (1996) : une Peugeot 203 consommait, en moyenne, 8 litres au cent kilomètres, contre un peu plus de 5 litres pour une Peugeot 205, soit un gain de 40 pour-cent en 40 ans ; sur la même période, la puissance d'un téléviseur a été divisée par 20 à 25 ; les lampes fluorescentes compactes, mises récemment sur le marché, consomment 4 fois moins d'électricité que les

¹ - « A systematic analysis of the trends in prices of natural resource commodities did not reveal any permanent interruption in the decline relative to commodities and services in general .»

ampoules traditionnelles. Tout ceci prouve l'existence de gains d'efficacité dans le passé. Il semble raisonnable de supposer que cette tendance devrait se poursuivre.

Historiquement, l'existence d'un progrès technique intensif en énergie est donc indubitable. Mais, la prolongation de cette tendance est problématique, tant elle influence la trajectoire de la consommation énergétique. Pour preuve, un taux d'amélioration du rendement énergétique de 1,5 pour-cent l'an réduit la consommation d'énergie de 80 pour-cent, toutes choses égales par ailleurs, par rapport à la situation où il n'y aurait aucun progrès (Manne & alli, 1995).

2.2.2.4 - Substitution entre l'énergie et les autres facteurs

Ce paramètre n'a qu'une influence indirecte sur la demande d'énergie. Selon sa valeur, l'effet du prix de l'énergie finale et du progrès technique est amplifié ou atténué.

Selon la valeur de l'élasticité de substitution, la production par unité d'énergie finale est une fonction : croissante à taux croissant ($\varepsilon > 1$), constant ($\varepsilon = 1$) ou décroissante ($\varepsilon < 1$) du prix de l'énergie finale ; décroissante ($\varepsilon > 1$), constante ($\varepsilon = 1$) ou décroissante ($\varepsilon < 1$) de l'efficacité énergétique.

2.2.2.5 - Effets de structure

Les discussions précédentes ont laissé de côté le rôle important de la structure de la consommation dans l'évolution historique de la consommation énergétique. Dans les modèles agrégés dont nous discuterons plus loin, ce déterminant est soit explicitement modélisé, soit simplement simulé, sur la base d'une hypothèse ad hoc.

L'effet de structure de la consommation sur la demande d'énergie ne peut être modélisé qu'à la condition de désagréger la consommation en plusieurs biens. Les déplacements de la demande entre ces types de biens, produits selon des techniques plus ou moins intensives en énergie, font alors apparaître des effets de structure susceptibles de modifier l'intensité énergétique de la production globale.

Tous les modèles bâtis autour de l'hypothèse, classique dans les modèles de croissance, d'un bien unique composite n'endogénisent pas le rôle des choix de consommation. Pour contourner cette difficulté, Manne & alli supposent une trajectoire prédéterminée du contenu en énergie de la consommation et l'intègrent dans le progrès technique intensif en énergie : « L'amélioration autonome de l'efficacité énergétique résume tous les moyens de réduction de l'intensité énergétique de l'output » comme par exemple le « déplacement de la demande des biens manufacturés vers les services » (1995, p. 22) ².

2.3 - Les émissions de carbone

Dans cette section, nous montrons le rapport étroit entre la consommation d'énergie et les émissions de carbone. Nous présentons ensuite les projections des émissions de carbone déterminées par quelques modèles mondiaux.

2.3.1 - De la consommation d'énergie aux émissions de carbone

Les émissions de dioxyde de carbone se déduisent de la consommation de chaque énergie fossile. La teneur en carbone du gaz naturel est de 13,7 kg / GJ, contre 19,9 kg / GJ pour le pétrole, 24,1 kg / GJ pour le charbon et 40 kg / GJ pour les combustibles synthétiques ³. L'épuisement du pétrole et du gaz naturel et leur remplacement progressif par le charbon et les combustibles synthétiques impliquent une élévation tendancielle de la teneur moyenne en carbone de l'énergie finale sur le siècle prochain.

L'évolution du contenu en carbone de l'énergie finale pourrait être fortement modifiée par l'application d'une politique climatique comme, par exemple, une taxe sur le contenu en

² - « AEEI summarizes all sources of reductions in the economy-wide energy intensity per unit of output » ... « shifts in the basic economy mix away from manufactured goods and toward more services ».

³ - Le joule mesure le pouvoir calorifique des énergies : 1 GJ = 1 milliard de joules.

carbone. En effet, avant toute réduction de la quantité d'énergie finale consommée, les

substitutions interénergétiques constituent sûrement la méthode la moins coûteuse pour parvenir à une réduction donnée des émissions de dioxyde de carbone.

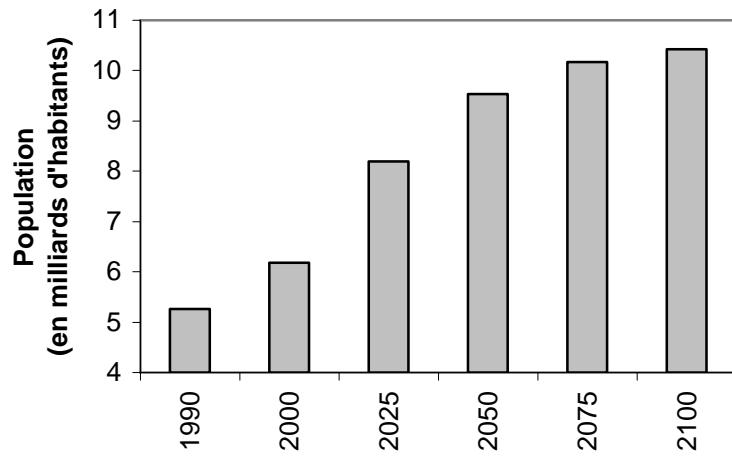
Remarque 2.1 : Pour ce qui est des autres gaz à effet de serre, ou bien ils ne sont pas modélisés (cas des modèles qui ne tiennent pas compte des dommages de l'effet de serre), ou bien leur trajectoire est supposée exogène.

2.3.2 - Projections des modèles mondiaux

Pour clore cette discussion, nous présentons les résultats des modèles globaux suivants : Carbon Rights Trade Model (Rutherford, 1993 : modèle “CRTM”) ; Edmonds-Reilly Model (Barns & alli, 1993 : modèle “ERM”) ; Manne-Richels Global 2100 Model (Manne, 1993 : modèle “MR”) (voir l’encadré 2.2) ; O.E.C.D. Model (Oliveira-Martins & alli, 1993 : modèle “GREEN”) (voir l’encadré 2.3).

Grâce à l’initiative de standardisation de l’O.C.D.E., les modèles globaux construits pour évaluer les coûts des politiques climatiques utilisent la même base de données. Les projections démographiques et du P.I.B. par tête utilisées sont celles de l’E.M.F. n°12. La population mondiale atteint un état stationnaire, au milieu du vingt-deuxième siècle, de onze milliards d’habitants.

Graphique 2.2 : Projection démographique



Source : O.C.D.E. (1993)

Les modèles GREEN et MR tiennent compte des technologies de recharge et utilisent des hypothèses très proches. Les combustibles synthétiques et l'hydrogène liquide produit par électrolyse sont disponibles, à partir de 2010, au prix de 8,33 et 16,67 dollars par GJ respectivement (sachant que le prix du pétrole de référence dans MR est de 3,7 dollars par GJ en 1990).

La standardisation des hypothèses s'arrête là. Les particularités de chaque modèle, comme le niveau de désagrégation sectorielle, le rôle du commerce international, la modélisation de la production, imposent des choix différents pour les autres paramètres.

Tableau 2.1 : Paramètres des modèles globaux

	CRTM	ERM	GREEN	MR
T (% / an)	0,5	1	1	0,5
ε	0,4	..	0,8	0,3 ou 0,4

Source : O.C.D.E. (1993)

Les modèles globaux supposent tous une substituabilité imparfaite entre l'énergie et les autres facteurs (le modèle de Whalley & Wigle (1993), qui n'est pas étudié ici, est celui qui propose la plus forte valeur pour ce paramètre, égale à 0,7) ⁴. Le taux d'amélioration autonome de l'efficience énergétique est compris entre 0,5 et 1 pour-cent par an.

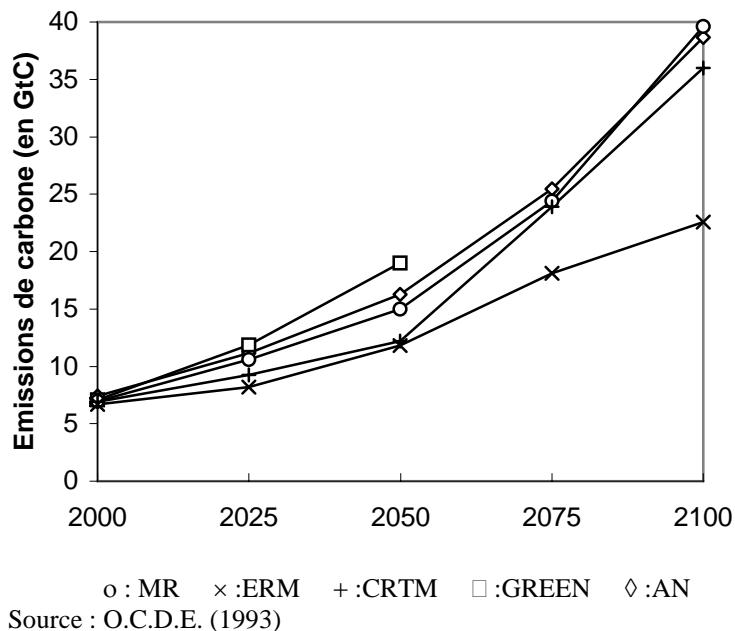
Le graphique 2.3 montre clairement que les projections diffèrent sensiblement d'un modèle à l'autre, variant du simple au double en 2100 ⁵. Les différences entre les projections de MR et de ERM proviennent, pour l'essentiel, d'un choix différent pour le taux

⁴ - Il convient de noter une particularité du modèle GREEN de l'O.C.D.E. qui, par le choix d'un emboîtement des fonctions de production différent des autres, postule que les élasticités de substitution entre l'énergie et le capital et entre l'énergie et le travail sont différentes.

⁵ - Dans une synthèse portant sur 10 modèles appliqués aux Etats-Unis, Gaskins & Weyant (1993) trouvent un intervalle encore plus grand : les projections font état d'une augmentation des émissions en 2100, par rapport à 1990, allant de 20 pour-cent à 200 pour-cent.

d'amélioration de l'efficacité énergétique ; les deux trajectoires sont voisines si le même taux est utilisé (résultat des tests de sensibilité). La proximité entre les projections de MR et de CTRM s'explique par le fait que les deux modèles sont construits autour de la même architecture centrale, i.e. le modèle Global 2100 de Manne.

Graphique 2.3 : Projections des émissions de dioxyde de carbone



La cinquième trajectoire du graphique 2.3, notée AN pour “application numérique”, est construite à partir de la fonction de demande (2.2). Les paramètres utilisés reflètent l'hypothèse moyenne des modèles globaux : la projection du P.I.B. mondial est celle de l'E.M.F. n°12 ; le taux d'amélioration du rendement énergétique est fixé à 0,75 pour-cent par an ; l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres inputs est égale à 0,5 ; le prix de l'énergie finale est supposé augmenter de cinquante pour-cent d'ici à 2050, puis se stabiliser ensuite ; le contenu en carbone de l'énergie finale est supposé constant jusqu'en 2050, croissant ensuite, pour tenir compte de l'utilisation croissante des combustibles synthétiques. Les deux dernières hypothèses sont évidemment arbitraires mais tiennent compte des éléments suivants : l'EMF n°12 projette que le prix du pétrole devrait être multiplié par deux d'ici à 2050 ; au-delà de cette date, les combustibles synthétiques prennent le relais, donc la hausse du prix des énergies fossiles cesse et le contenu en carbone de l'énergie finale

augmente ; la substitution de l'électricité aux énergies fossiles limite partiellement l'élévation du prix de l'énergie finale. La projection obtenue coïncide correctement avec les résultats des modèles mondiaux et nous incite à penser que notre analyse des déterminants économiques des émissions de carbone est pertinente.

Encadré 2.2 : Global 2100 (Manne, 1993)

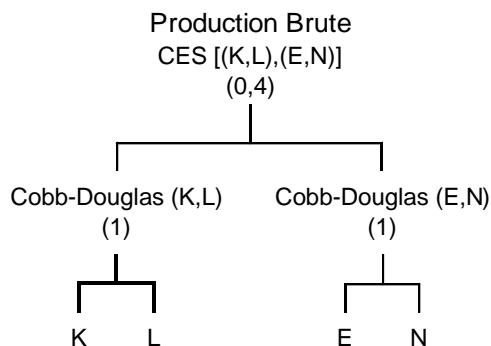
Global 2100 étudie les coûts régionaux de la réduction des émissions de carbone sur la période 1990-2100. Il comporte 5 régions. Il offre une description détaillée de la branche énergétique, avec 9 technologies pour l'énergie électrique et 9 technologies pour l'énergie non électrique. Par contre, il considère un unique bien de consommation composite. Le commerce mondial se limite au pétrole brut.

La dynamique de Global 2100 provient de :

1. l'évolution démographique, qui crée l'offre de travail, supposée proportionnelle à la population ;
2. l'accumulation du capital ;
3. l'évolution des réserves d'énergies fossiles, par combinaison de l'extraction et de la découverte de nouveaux gisements. L'offre des énergies fossiles résulte d'un arbitrage intertemporel du type Hotelling ;
4. l'amélioration autonome de l'efficience énergétique, qui incorpore des progrès technologiques et des effets de structure, liés au déplacement de la demande vers des biens moins intensifs en énergie ;
5. l'apparition de technologies de recharge à des dates et des prix exogènes.

Le consommateur représentatif maximise son utilité intertemporelle (fonction d'utilité logarithmique). Il anticipe parfaitement l'avenir et établit son programme d'épargne en conséquence (de la même façon que dans le modèle de Ramsey).

La production globale est représentée par une fonction CES, à rendements constants d'échelle, de deux inputs composites .



Notes :

L=travail K=capital E=énergie électriques N=énergie non électrique ;
Les valeurs entre parenthèses désignent les élasticités de substitution.

Encadré 2.3 : GeneRal Equilibrium EnviroNmental model (Burniaux & alli, 1992a)

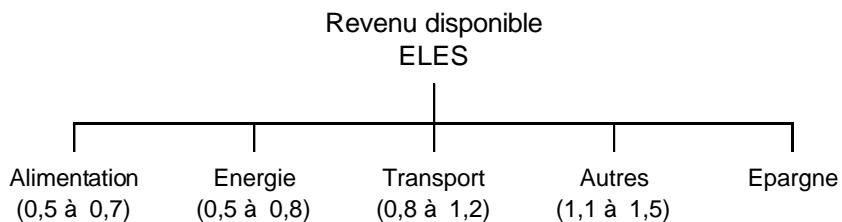
GREEN est conçu pour étudier les coûts régionaux de la réduction des émissions de carbone sur la période 1990-2050. Il comporte 12 régions et 11 branches d'activité, dont 8 pour l'énergie et 3 pour les autres biens de consommation. Le commerce mondial concerne tous les biens.

Encadré 2.3 (suite)

La dynamique de GREEN intègre 5 composantes :

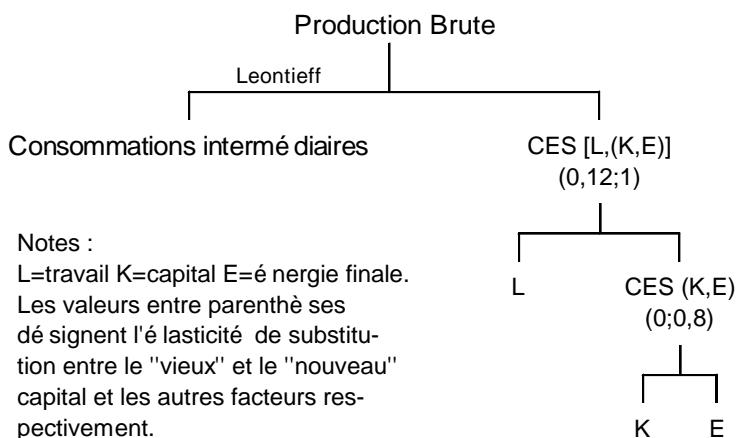
1. l'évolution démographique influence la demande de consommation et l'offre de travail, qui est proportionnelle à la population ;
2. l'accumulation du capital ;
3. l'épuisement des énergies fossiles résulte de l'extraction et de la découverte de nouveaux gisements. Le rythme de conversion des réserves supposées (à découvrir) en réserves prouvées (en exploitation) est sensible aux prix courants. L'offre potentielle, quantité maximale que les producteurs sont disposés à offrir, dépend des réserves totales et borne l'offre effective des énergies fossiles ;
4. l'amélioration autonome de l'efficience énergétique ;
5. l'apparition de back-stops à des dates et des prix exogènes.

Le consommateur représentatif maximise son utilité intertemporelle et répartit son revenu entre les 4 types de biens. L'arbitrage entre la consommation et l'épargne est statique, le prix du capital étant supposé égal au prix moyen des biens de consommation. GREEN utilise un système de dépense linéaire élargi (Lluch, 1973).

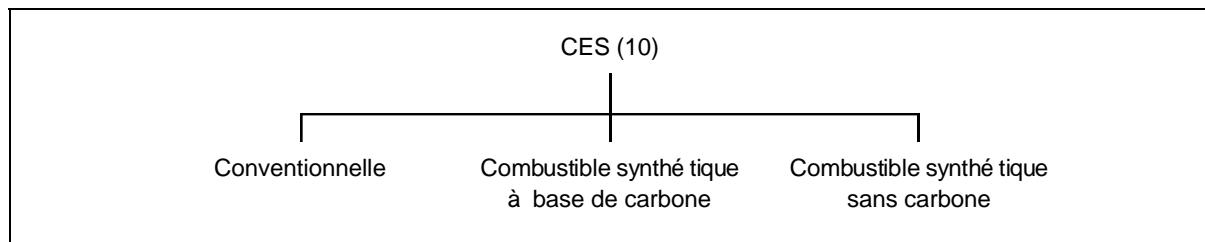


Note : L'intervalle entre parenthèse désigne l'élasticité-revenu du bien dans les différentes régions.

La production de chaque branche est à rendements constants d'échelle. Les producteurs minimisent leurs coûts de production. GREEN distingue entre le "vieux" et le "nouveau" capital, la différence entre les deux provenant des possibilités de substitution avec les autres facteurs.



L'énergie finale est produite à partir des énergies conventionnelles et des back-stops :



2.4 - Résultats des modèles mondiaux

Afin de donner une grille de lecture des résultats des modèles globaux, nous énumérerons, au cours d'une première sous-section, les déterminants du coût de la réduction des émissions de carbone, en nous appuyant sur des raisonnements d'équilibre partiel. Nous insisterons sur le rôle dominant des possibilités de substitution entre facteurs. Nous montrerons également l'importance des innovations technologiques, principalement dans leur faculté à élargir les opportunités de substitutions interénergétiques.

Dans la sous-section suivante, nous commenterons les résultats des modèles globaux à l'aide de l'analyse qui les précède.

2.4.1 - Les déterminants du coût de la dépollution

Commençons notre exposé par une lapalissade : plus l'économie est dépendante de l'énergie, plus il lui sera difficile de s'en passer. La dépendance d'une économie vis-à-vis de l'énergie peut être mesurée à l'aide des deux indicateurs que sont la part de l'énergie dans le P.I.B. et l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres facteurs de production.

Montrons maintenant de quelle manière ces deux indicateurs nous renseignent sur le coût de la réduction de la consommation d'énergie.

Quelle que soit la spécification choisie, si les facteurs de production sont rémunérés à leur productivité marginale, le coefficient budgétaire de l'énergie, $w = p.E/Y$, est égal à l'élasticité de la production par rapport à ce facteur, $\rho = \partial \log Y / \partial \log E$. Il permet donc une évaluation du coût des économies d'énergie : toutes choses égales par ailleurs, plus la part de l'énergie dans le coût de production est grande, plus il est coûteux d'en réduire la consommation d'un pourcentage donné.

Ainsi, Cline (1994), notant que l'énergie représente 8 pour-cent du P.I.B. des Etats-Unis, déduit qu'une mesure visant l'objectif d'une baisse de 10 pour-cent de la consommation d'énergie provoquerait une baisse de 0,8 pour-cent du P.I.B.

La mesure du coût des économies d'énergie par la méthode précédente reste correcte, dans la durée, à condition que le coefficient budgétaire demeure constant. Or, Percebois (1995, p. 91) indique que « l'élasticité de la production par rapport à l'énergie est tantôt nettement supérieure à l'unité, tantôt nettement inférieure à l'unité ». La perte de production, en pourcentage, suite à une limitation de la consommation énergétique d'un certain pourcentage va donc varier à travers le temps. Pour illustrer ce point, revenons à l'exemple de la fonction de production agrégée C.E.S. A l'optimum, le coefficient budgétaire est égal à :

$$w = a^\varepsilon \left(\frac{p}{T} \right)^{1-\varepsilon}. \quad (2.3)$$

Dans le cas particulier où l'élasticité de substitution entre les facteurs est unitaire, la fonction de production est de type Cobb-Douglas et l'élasticité de la production par rapport à l'énergie ne varie pas. Alors, toute limitation supplémentaire de 1 pour-cent de la consommation d'énergie réduit la production globale de a pour-cent.

Dans le cas contraire, le coefficient budgétaire évolue sous l'impulsion du prix de l'énergie et du progrès technique non neutre. Supposons, dans un premier temps, que le prix de l'énergie augmente plus rapidement que l'efficience énergétique : si l'élasticité de substitution est comprise entre zéro et un, la dépendance de l'économie vis-à-vis de l'énergie a tendance à augmenter et il devient de plus en plus coûteux de réduire la consommation énergétique ; si elle est supérieure à un, la part de l'énergie dans le coût total de production diminue et le coût des économies d'énergie diminue. Supposons maintenant que le prix réel de l'énergie diminue, i.e. que le prix de l'énergie augmente moins vite que l'efficacité énergétique, on aboutit à la conclusion symétrique : si l'élasticité de substitution est comprise entre zéro et un, il devient de moins en moins coûteux de réduire la consommation énergétique ; si elle est supérieure à un, le coût augmente.

La relation (2.3) donne une idée du coût des économies d'énergie le long de la trajectoire de politique inchangée. Cependant, une appréciation plus correcte de celui-ci doit incorporer le renchérissement de l'énergie finale lié à la contrainte d'émission étudiée. Dans l'annexe 2.2, nous montrons, à partir d'une relation empruntée à Oliveira-Martins & alli (1993), que le coefficient budgétaire de l'énergie dépend du quota d'émission imposé :

$$w(R) = w \cdot (1 - R)^{1/\varepsilon}. \quad (2.4)$$

où

w définit le coefficient budgétaire sans contrainte d'émission (voir la relation (2.3)),
 R mesure le taux de réduction des émissions relativement à la trajectoire de politique inchangée.

Du fait de (2.4), si l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres facteurs est inférieure à l'unité, le coefficient budgétaire de l'énergie augmente également avec le quota d'émission. Il s'ensuit que chaque pour-cent supplémentaire de réduction des émissions s'obtient plus difficilement que le précédent.

Pour déduire le coût de la réduction des émissions de carbone du coût des économies d'énergie, Cline utilise l' « élasticité de la disponibilité d'énergie finale par rapport à la quantité de carbone » (1994, p. 101). Elle est égale à la diminution, en pour-cent, de la production de la branche énergétique nécessaire pour réduire les émissions de carbone de un pour-cent. Les calculs de Cline indiquent qu'elle serait proche de 0,5 en 1990. Pour reprendre son exemple, le coût économique de la réduction de 10 pour-cent des émissions de carbone correspondrait alors à 0,4 pour-cent du P.I.B. ($0,08 \times 0,5 \times 10 = 0,4$).

L'élasticité de la production de la branche énergétique par rapport aux émissions de carbone dépend des possibilités de substitutions interénergétiques et, plus particulièrement, de la facilité avec laquelle la branche énergétique peut remplacer les énergies primaires à base de carbone (pétrole, gaz naturel, charbon et combustibles synthétiques) par les énergies sans carbone (électricité et hydrogène liquide).

Comme l'électricité est un substitut imparfait des énergies fossiles, la première ne pourra jamais remplacer intégralement les dernières. Donc, sans l'intervention de la technologie de remplacement sans carbone, une limitation drastique des émissions de carbone nécessiterait une réduction très importante de la production énergétique.

Toutefois, au-delà d'un certain seuil de réduction des émissions de carbone, la technologie de remplacement sans carbone devient rentable. A l'instant où elle supplante toutes les énergies à base de carbone, la réduction des émissions se fait sans perte de production énergétique supplémentaire, en remplaçant les énergies fossiles par la back-stop. Comme cette dernière est produite à un coût marginal constant en quantités potentiellement très grandes, le coût de la contrainte d'émission, mesuré par rapport à la situation de politique inchangée, devient linéaire.

La question qui se pose alors est de savoir quand cette situation pourrait se produire. Deux conditions doivent être remplies. Premièrement, la technologie en question doit être opérationnelle (à partir de 2010 selon l'E.M.F. n°12). Deuxièmement, la taxe sur les émissions de carbone doit être suffisante pour justifier d'abandonner les énergies fossiles. Dans le tableau 2.2, nous évaluons le seuil d'abandon des énergies à base de carbone aux prix de 1990.

Tableau 2.2 : Seuils d'abandon des énergies à base de carbone

	Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Combustibles synthétiques
Prix (\$/GJ) (a)	2	3,7	2,75	8,33
Teneur en carbone (tC/GJ) (a)	0,0241	0,0199	0,0137	0,04
Taxe maximale (\$/tC)	608,7	651,8	1016,1	208,5

Note : le prix de la technologie de remplacement sans carbone est de 16,67 \$/GJ. La taxe maximale s'obtient en convertissant le différentiel de prix avec l'énergie carbonée en \$/tC. Dans le cas du charbon, le calcul s'écrit : $(16,67 - 2)/0,0241$.

(a) : Source : Manne & alli (1995).

Le tableau suggère qu'il faudra des taxes très importantes pour inciter à abandonner les énergies carbonées. Nous rappelons, toutefois, que les prix de ces ressources sont amenés à augmenter, réduisant d'autant la taxe maximale nécessaire.

Cette discussion résume l'essentiel de la dynamique du coût économique de la réduction des émissions de carbone. Nous passons maintenant à la présentation des résultats des modèles d'équilibre général calculables.

2.4.2 - Evaluations par les modèles mondiaux

Les modèles globaux, participant au projet d'étude comparative de l'O.C.D.E. et de l'E.M.F., testent quatre scénarios de réduction des émissions de dioxyde de carbone. La stabilisation aux niveaux de 1990 fait écho aux tractations internationales de la conférence de Rio (1992)⁶. Cette première hypothèse pénalise plus fortement les pays à forte croissance potentielle. Les autres scénarios prévoient une réduction de respectivement 1, 2 et 3 pour-cent des taux de croissance régionaux des émissions, le long des trajectoires de politique inchangée (nous les appellerons scénarios 1%, 2% et 3% respectivement). A contrario du scénario de stabilisation, ces trois propositions répartissent l'effort de dépollution plus équitablement entre les régions et semblent plus acceptables. Les modèles mondiaux considèrent au moins cinq régions : les Etats-Unis, le reste de l'O.C.D.E., l'Ex-U.R.S.S., la Chine et le reste du Monde.

Vu les scénarios de dépollution retenus par les auteurs des modèles mondiaux, on saisit mieux l'importance des projections des émissions de carbone prévues par les modèles. Or, comme on a déjà eu l'occasion de le souligner, les trajectoires du scénario de politique inchangée diffèrent sensiblement d'un modèle à l'autre, ce qui complique singulièrement toute tentative de comparaison. Pour contourner cette difficulté, nous convertirons les réductions d'émissions en pourcentage par rapport à la trajectoire de référence de chaque modèle. Ceci revient à supposer que l'effort demandé à l'économie pour atteindre l'objectif de dépollution est plus proportionnel à la réduction relative qu'à la réduction absolue des émissions.

⁶ - En fait, dans le traité, cette objectif ne concerne que les pays de l'O.C.D.E.

Notre discussion porte sur les deux variables que sont le coût économique, mesuré en pourcentage du P.I.B. de référence, et la taxe sur le contenu en carbone nécessaire pour respecter le quota d'émission imposé. Nous avons restreint notre étude à deux modèles mondiaux seulement, celui de Manne (1993) et celui de Oliveira-Martins & alli (1993). L'élimination du modèle de Rutherford (1993) s'explique par des raisons pratiques (nous n'avons pas trouvé toutes les valeurs). Il n'est pas tenu compte du modèle de Edmonds & Reilly (1993), car il ne modélise pas les technologies de remplacement et produit, de ce fait, des résultats atypiques (des taxes et des coûts très élevés pour des niveaux de dépollution importants). Nous présenterons les résultats sous forme graphique. Les données utilisées pour les construire sont tirées du document de synthèse de l'O.C.D.E. « Les coûts de la réduction des émissions de carbone : Résultats tirés des modèles mondiaux » (1993).

2.4.2.1 - Coût de la réduction des émissions de carbone

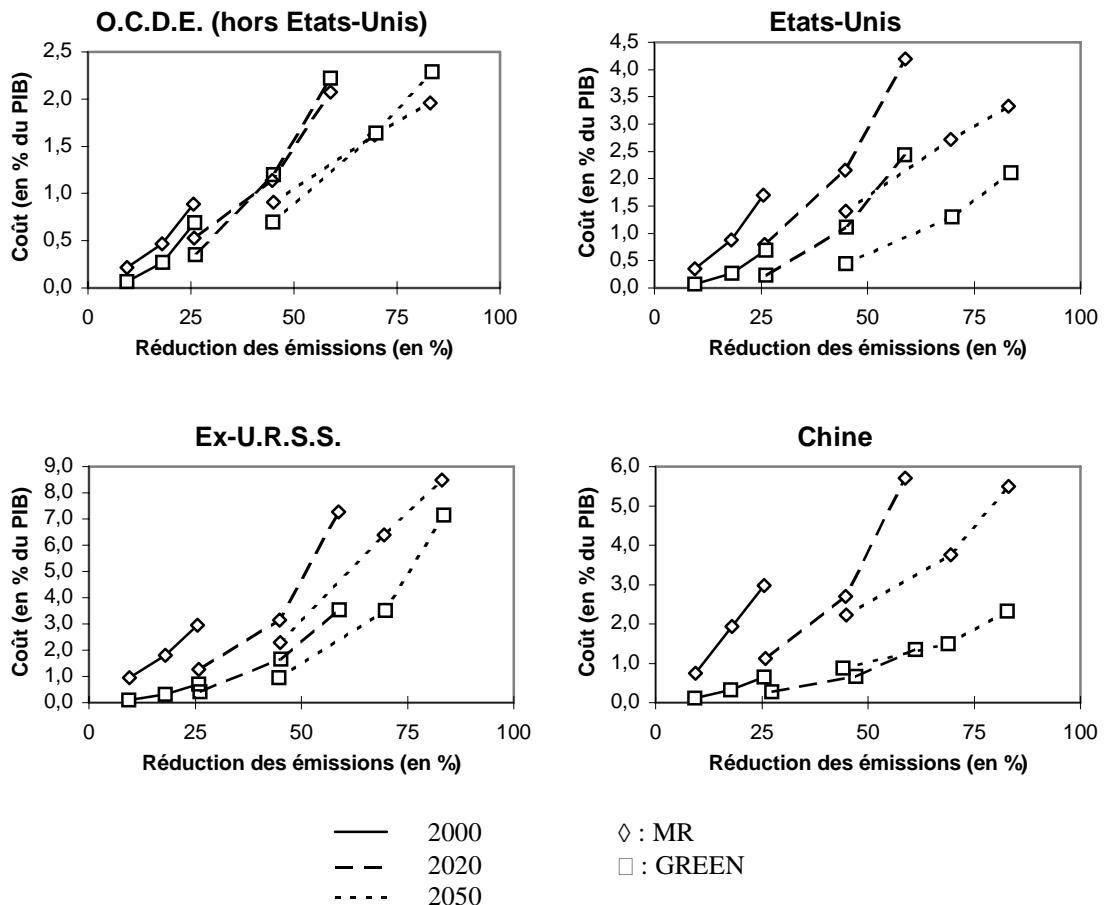
Le graphique 2.4 montre le coût des scénarios 1%, 2% et 3%, exprimé en pourcentage du P.I.B. de politique inchangée, pour quatre régions du monde, aux dates successives 2000, 2020 et 2050. Chaque courbe se compose de trois points, un par scénario. Suivant les recommandations de Dean & Hoeller (1993), nous laissons de côté la région “reste du monde”, considérant qu'elle est trop hétérogène pour être analysée correctement.

Winters (1992) constate que les modèles (ceux que nous étudions et d'autres) s'accordent sur un coût allant de 1 à 4 pour-cent du P.I.B. mondial, pour une réduction de 40 à 50 pour-cent des émissions de dioxyde de carbone à long terme. L'observation du graphique 2.4 confirme ce constat.

Les disparités régionales autour de cette valeur centrale sont grandes. Ainsi, les estimations de MR montrent qu'une réduction des émissions de moitié en 2050 diminuerait d'environ 2,5 pour-cent le P.I.B. de la Chine et de l'Ex-U.R.S.S., contre 1,5 pour-cent pour les Etats-Unis et 1 pour-cent pour le reste de l'O.C.D.E. Manne explique le coût élevé des réductions de carbone en Chine par : son fort potentiel de croissance ; ses très importantes

réserves de charbon convertibles en combustibles synthétiques et en électricité ; ses réserves réduites de gaz naturel et de pétrole.

Graphique 2.4 : Coûts de la réduction des émissions de carbone



Sauf pour le cas de l'O.C.D.E., où les résultats sont très proches, le modèle MR surestime systématiquement le coût, par rapport au modèle GREEN. La raison de cette différence pourrait provenir des prix de référence utilisés dans les deux modèles pour les énergies primaires. GREEN maintient, tout au long de la période de simulation, des différentiels de prix régionaux très importants (liés à de fortes subventions énergétiques appliquées en Chine et en Ex-U.R.S.S.). MR fait l'hypothèse inverse d'un rééquilibrage des prix régionaux aux cours mondiaux, par élimination rapide des subventions énergétiques. Ainsi, les énergies fossiles en Chine et en Ex-U.R.S.S. sont meilleur marché dans GREEN. Ceci fait que ces

régions gardent, par rapport au scénario de référence, d'importantes potentialités d'économies d'énergie par substitution et qu'il leur est moins coûteux de limiter leurs émissions de carbone.

L'autre résultat important qui ressort des simulations est que le coût économique d'une même réduction décroît avec le temps. Ce mouvement s'observe très nettement sur les deux premiers graphiques, moins sur les deux autres. La raison de cette translation réside dans l'introduction progressive des énergies de remplacement sans carbone, qui élargit les possibilités de substitutions interénergétiques et permet une offre d'énergie finale plus grande, à émission de carbone identique. A terme, le coût devient linéaire, alors qu'il était croissant à taux croissant initialement, car la technologie sans carbone supplante les énergies conventionnelles et le coût marginal de la dépollution devient constant⁷.

2.4.2.2 - Taxe sur le contenu en carbone

Les taxes sur le carbone, calculées par les modèles mondiaux, correspondent au renchérissement nécessaire de chaque énergie pour atteindre le niveau cible de réduction des émissions de carbone. Elles évaluent donc le coût marginal du quota d'émission considéré.

Oliveira-Martins & alli (1993) déterminent une formule simple de la taxe sur le carbone en équilibre partiel :

$$\gamma = \frac{p}{\alpha} \cdot \left[(1-R)^{-\frac{1}{\varepsilon}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

où

α mesure la teneur moyenne de l'énergie finale en carbone,

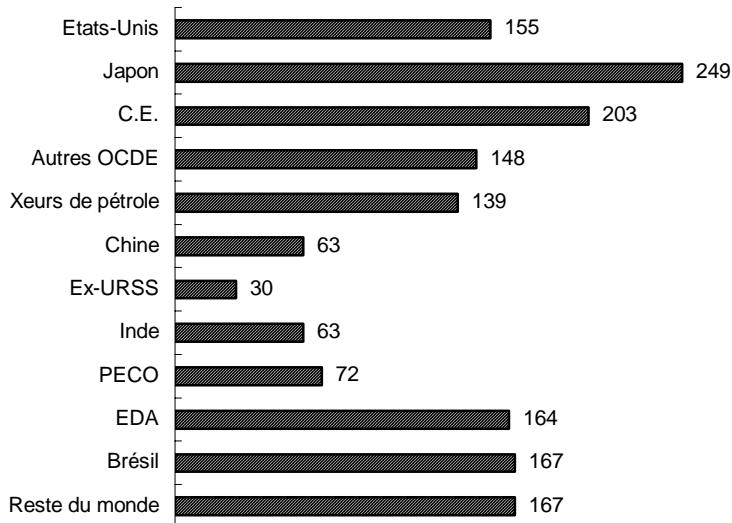
R est le taux de dépollution cible, en pourcentage de la pollution de référence.

⁷ - Ce phénomène s'observe moins franchement en ex-U.R.S.S. et en Chine car ces pays, du fait d'un prix des énergies fossiles plus réduit, adoptent plus tardivement les technologies de remplacement sans carbone (voir le tableau 2.2).

La taxe sur le carbone est directement proportionnelle au prix de l'énergie finale et inversement proportionnelle à son contenu en carbone. Elle croît à taux croissant avec l'effort de dépollution.

Il est intéressant de noter que le rapport p/α représente, en fait, le prix moyen de l'émission de carbone. Compte tenu de (2.5), plus l'émission de carbone est chère le long de la trajectoire de politique inchangée, plus la taxe nécessaire pour réduire l'émission d'une valeur donnée est élevée. La comparaison internationale de la tarification implicite du carbone délivre donc une première indication sur la disparité des coûts marginaux de réduction des émissions.

Graphique 2.5 : Prix de l'énergie finale en \$/tC (données de 1985)

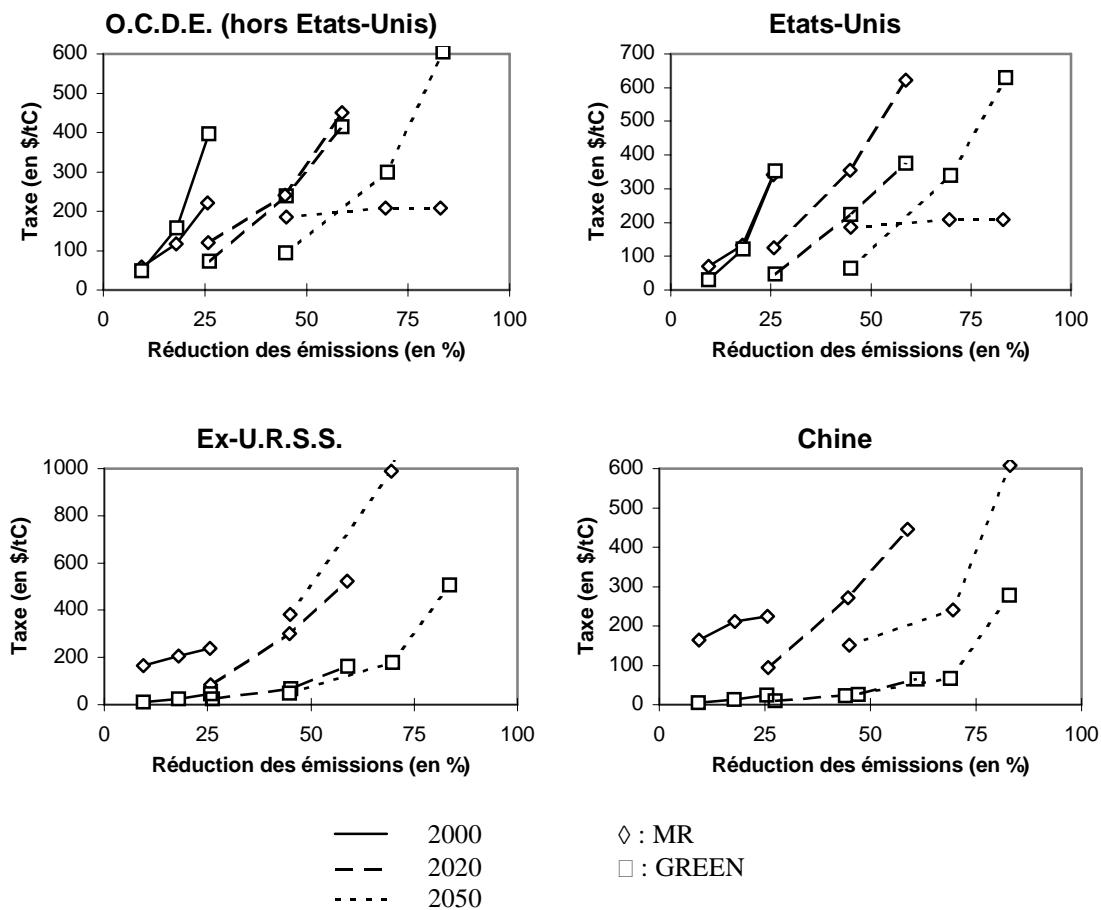


Source : Coppel (1994)

Le graphique 2.5, basé sur les travaux de Coppel (1994), indique une forte dispersion du prix du carbone entre les régions du monde. La dichotomie entre certains pays de l'O.C.D.E. et la Chine, l'ex-U.R.S.S., l'Inde et les pays d'Europe de l'est résulte essentiellement des fiscalités de part et d'autre : de fortes taxes sur l'énergie en Europe et au Japon, contre des mesures de subvention de la consommation énergétique dans les autres pays. Les conséquences de ces différences sont, compte tenu de (2.5), un coût marginal de dépollution élevé en Europe et au Japon, faible en Chine, en ex-U.R.S.S., en Inde et dans les pays

d'Europe de l'est, et intermédiaire dans les autres régions du monde. Bien que cette typologie se retrouve clairement dans les résultats des modèles mondiaux, l'utilisation de la relation (2.5) doit être nuancée car elle néglige un certain nombre d'ajustements importants, comme la baisse de la teneur en carbone de l'énergie finale par substitutions interénergétiques. Sur ce point, les résultats des modèles d'équilibre général apportent plus d'informations.

Graphique 2.6 : Coûts marginaux de limitation des émissions



L'observation du graphique 2.6 appelle les commentaires suivants. Le modèle GREEN suggère que le coût marginal de la dépollution est plus faible dans les pays hors O.C.D.E. La Chine réduit à faible coût ses émissions de dioxyde de carbone parce que ses réserves de charbon sont abondantes : prix faible de l'énergie et fort contenu en carbone. Dans le cas de l'Ex-U.R.S.S., le coût marginal est faible car le prix de l'énergie est réduit et les réserves de gaz naturel y sont abondantes.

Le modèle MR ne partage pas cette analyse. Il propose des évaluations du coût marginal de la réduction des émissions, pour l'Ex-U.R.S.S. et la Chine, sensiblement plus grandes que GREEN. La raison est une fois de plus à chercher dans le choix des prix de référence régionaux pour les énergies fossiles.

La forme générale des courbes suggère que chaque pour-cent de dépollution supplémentaire s'obtient plus difficilement que le précédent : il y a saturation progressive des possibilités de substitution. Le rendement de la taxe est donc décroissant. A court terme, ce phénomène se vérifie surtout dans les régions où le prix de l'énergie est déjà élevé : les courbes de coût marginal des pays de l'O.C.D.E. sont beaucoup plus pentues (année 2000). Cette différence régionale s'estompe ensuite, car les technologies de remplacement sont introduites plus tôt et plus massivement dans ces régions ; les pays industrialisés inventent, de cette manière, de nouvelles possibilités de substitution. Avec le modèle MR, cette modification conduit au cas extrême pour la zone O.C.D.E. d'un coût marginal constant, quelle que soit la dépollution, en 2050. Le modèle GREEN n'aboutit pas au même résultat. Ceci résulte peut-être du fait qu'il postule une élasticité de substitution finie entre les énergies conventionnelles et la technologie de recharge sans carbone.

L'utilisation des technologies de recharge sans carbone impulse également une translation des courbes de coût marginal au cours du temps. Le rendement de la taxe, en termes de dépollution, augmente donc. Ce mouvement reste vrai avec MR pour tous les pays. Par contre, GREEN ne prédit aucune déformation des systèmes productifs de la Chine et de l'Ex-U.R.S.S., qui restent en effet sur la même courbe de coût marginal à toute date (la réunion des trois courbes forme une courbe presque continue). Là encore, le prix très faible de l'énergie dans ces deux pays retarde l'introduction des technologies de remplacement et explique ce résultat.

2.4.3 - Critiques des modèles mondiaux

Parmi les chercheurs qui étudient le coût économique de la réduction des émissions de carbone, certains sont pessimistes et d'autres sont optimistes. Les concepteurs des modèles

globaux se classent plutôt dans la première catégorie. Ils considèrent que l'économie ne souffre d'aucune distorsion et que toute intervention pour la dévier de son état d'équilibre est source de coût. Ainsi, Manne (1993, p. 59) écrit-il : « si le système présent fonctionne efficacement, les limitations des émissions de carbone impulsées par les gouvernements conduisent nécessairement à une réduction du P.I.B. »⁸.

Les optimistes, membres de l' “école sans regret”, croient, pour leur part, qu'une partie de la dépollution peut être obtenue sans coût. Ils justifient leur position par l'existence supposée de distorsions qui écartent l'économie de l'optimum. La nature de ces imperfections est tantôt d'ordre fiscal, tantôt d'ordre informationnel. Leurs arguments peuvent être convaincants et méritent d'être exposés.

2.4.3.1 - Distorsions fiscales

Les marchés régionaux des énergies fossiles sont très variés. Selon les régions, la consommation énergétique peut être lourdement taxée ou subventionnée. Burniaux & alli (1992b) ont consacré une étude à ces questions. Ils observent que les pays non-membres de l'O.C.D.E. recourent massivement aux subventions énergétiques. Le prix des énergies fossiles y serait ainsi abaissé de 25 pour-cent, en moyenne, par rapport au cours mondial, ce qui équivaudrait à une subvention implicite de 48 dollars par tonne de carbone émise. En se basant sur les calculs de GREEN (des mêmes auteurs), la suppression de ces subventions, d'ici à l'an 2000, réduirait de plus de 20 pour-cent les émissions de carbone dans ces régions (voir le graphique 2.6).

L'élimination des subventions énergétiques peut donc réduire sensiblement les émissions de carbone. Seulement, avant d'en conclure que cette action doit être engagée, il faut s'interroger sur le bien-fondé ou, au contraire, l'inutilité des subventions incriminées. C'est sur la réponse apportée à cette question que porte le désaccord entre les tenants de l'approche sans regret et

⁸ - « If the current system is operating optimally, government mandated limitations on carbon emissions can only lead to a reduction in conventionally measured GDP ».

les autres. La position de Oliveira-Martins & alli, dans le modèle GREEN, est très claire, puisqu'ils maintiennent la structure des prix régionaux au niveau de 1990 dans leurs simulations (cela ne reflète pas nécessairement le sentiment réel des concepteurs du modèle GREEN sur le sujet mais peut s'expliquer par le caractère arbitraire de toute autre hypothèse). L'opinion opposée, consistant à affirmer que toutes les subventions doivent être supprimées, n'est pas raisonnable, mais on peut penser qu'une partie de ces incitations n'a pas de réelle justification économique. Cette question devrait donc être approfondie.

Outre le problème de la tarification de l'énergie, certains chercheurs pensent que la perspective d'une politique de réduction des émissions de carbone et les recettes fiscales qui l'accompagnent sont l'occasion de réformer en profondeur les régimes fiscaux existants. Une taxe sur les émissions de carbone dégagerait une recette fiscale importante, qui pourrait se substituer à d'autres formes d'imposition reconnues désincitatives. Ainsi, dans une étude économétrique, « Jorgenson et Yun (1990) estiment que, pour un dollar de recettes fiscales collecté aux Etats-Unis, ces effets secondaires néfastes sont la cause d'une perte économique d'environ 38 cents » (Cline, 1994). Pearce (1991) parle de “double dividende” de la taxe sur le carbone : d'une part, elle corrige l'externalité climatique ; d'autre part, elle trouve un autre emploi bénéfique dans sa réaffectation ou par sa simple existence.

L'idée de double dividende a trouvé de nombreux emplois dans la littérature. Zagamé (1994) analyse les modalités d'une affectation de l'écotaxe européenne (taxe mixte 50/50 sur le carbone et l'énergie) à la baisse des charges patronales. Les résultats de plusieurs modèles économétriques indiquent qu'une telle taxe améliorerait la situation de l'emploi et la croissance économique en Europe (sauf dans les pays producteurs d'énergie) à moyen terme. Par contre, cet effet bénéfique serait compensé, à long terme, par des tensions inflationnistes. Brinner & alli (1991) réalisent une étude semblable pour le cas des Etats-Unis. Ils montrent que la redistribution des recettes fiscales dégagées par une taxe sur les carburants en faveur d'une baisse des charges patronales limite fortement le coût économique de la mesure à court terme, avant de produire un effet favorable à long terme.

Martin (1994) suggère qu'une taxe sur le carbone aurait pour effet de rééquilibrer la concurrence entre le transport routier et les autres moyens de transport. Il affirme que l'automobile en milieu urbain et le transport routier de marchandises sont implicitement subventionnés, si l'on fait la somme de tous les effets externes qu'ils engendrent : infrastructures, congestion, accidents, atteintes à l'environnement (bruit et pollutions)....

En dépassant le simple cadre des transports, l'énergie est la principale cause d'un bon nombre des problèmes environnementaux dont souffrent les sociétés modernes : les pluies acides, qui détruisent les forêts continentales européennes et américaines ; l'oxyde de carbone, l'oxyde d'azote, certains composés organiques volatiles et le plomb, dangereux pour la santé. Toutes ces externalités laissent à penser que la taxation du carbone, donc des énergies fossiles, s'accompagne d'un double dividende. Boyd & alli (1995) en donnent une excellente illustration. Ils construisent un modèle d'équilibre général statique (14 secteurs, 6 agents économiques représentatifs différenciés par leur revenu, 3 facteurs de production) calibré sur l'économie américaine. Ils évaluent les dommages environnementaux liés à l'usage de l'énergie, à l'exclusion de l'accroissement de l'effet de serre : plomb, particules en suspension, oxyde de souffre, ozone et perte de visibilité. Partant de là, ils déterminent la taxe sur le carbone qui permet de maximiser le bien-être global, solde entre les avantages et les coûts de la dépollution. Selon leurs calculs, la réduction des émissions de carbone correspondante serait comprise entre 5 et 38 pour-cent (plusieurs hypothèses sont testées concernant l'évaluation des dommages et les possibilités de substitutions interénergétiques).

Une acception plus restrictive du concept de double dividende est la notion de “politique sans regret”. Une décision est qualifiée de sans regret lorsqu'elle procure à l'économie un avantage net positif ou nul, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (Treadwell & alli, 1994), les avantages en termes de climat n'étant pas comptabilisés. Boyd & alli (1995) (voir ci-dessus) suggèrent donc de prolonger la politique d'environnement jusqu'au point où les coûts de la dépollution sont juste compensés par les avantages présents, indépendamment de l'effet de serre. Si une telle politique était menée, les taux de réduction des émissions de carbone atteindraient, selon leurs évaluations, entre 8 et 64 pour-cent. Ce faisant, on mènerait une politique non coûteuse tout en réduisant l'effet de serre.

2.4.3.2 - Problèmes d'information et approche technico-économique

De nombreuses études, rapportées par Williams (1990), Swisher & Johnson (1992) et Cline (1994), font état de la possibilité de réduire sensiblement la consommation énergétique sans perte de P.I.B. Williams (1987) montre que l'économie américaine pourrait, dans le même temps, réduire sa consommation d'énergie primaire de 30 pour-cent entre 1980 et 2020 et multiplier tout de même son P.I.B. par 2,7 (ce qui correspond à un taux de croissance moyen de 2,5 pour-cent sur la période). Certaines études technico-économiques appliquées au coût de la réduction des émissions de carbone (Swisher, 1992 ; Jackson, 1991 ; Block, 1991) concluent que les pays industriels pourraient réduire leurs émissions de gaz carbonique de 15 à 25 %, par rapport au niveau de 1990, pour un coût nul ou faible (Johansson & Swisher, 1994). Dans le même ordre d'idée, la National Academy of Science (1991) a déclaré possible une baisse de « 10 à 40 % des émissions de gaz à effet de serre aux Etats-Unis par rapport à 1990 à faibles coûts, voire en réalisant des économies nettes » (Cline, 1994 , p. 103). La liste pourrait être rallongée mais cela deviendrait fastidieux.

Les analyses technico-économiques mettent au point des scénarios de planification énergétique. Les étapes nécessaires à cette prospective sont les suivantes (Johansson & Swisher, 1994) : la demande présente et future de services énergétiques (chauffage, éclairage, transport...) est d'abord évaluée ; puis il faut dresser l'inventaire de toutes les technologies disponibles capables de satisfaire ses besoins ; les conditions d'offre des différentes technologies sont ensuite étudiées ; pour finir, l'étude technico-économique recherche le meilleur scénario, alliant faisabilité économique et politique, et garantissant un coût environnemental le plus faible possible, grâce à l'application des technologies ayant le meilleur rendement. Elle planifie les mesures d'accompagnement rendant possible sa réalisation : des réglementations, des programmes d'information et des modifications de la fiscalité...

L'idée d'une limitation gratuite des émissions de carbone peut séduire ; mais, comment peut-on justifier que le marché ne s'oriente pas automatiquement vers la solution technico-

économique ? Les problèmes d'information et les coûts de transaction, liés à l'inertie des comportements, sont peut-être la cause de cette apparente inefficacité du marché. A coup sûr, les agents économiques ne disposent pas des mêmes informations que les ingénieurs à l'origine des études mentionnées. Même s'ils souhaitaient réunir ces données pour prendre la décision la plus sage, il est fort probable que le temps perdu et les coûts engagés les dissuaderaient de le faire. Tout ceci explique l'apparente incohérence des choix individuels et incite à accréditer l'approche technico-économique jusqu'à un certain point seulement.

2.5 - Conclusion

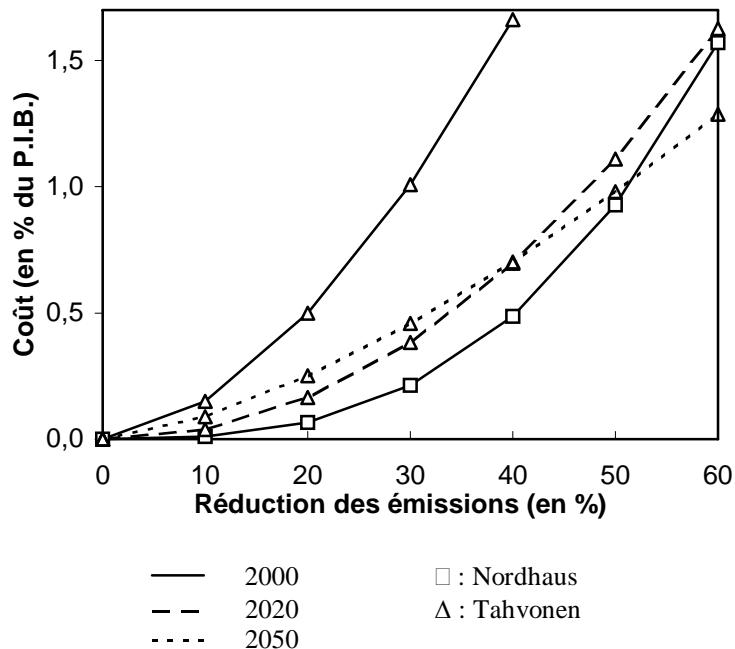
Les modèles mondiaux n'étudient pas le rapport coût / avantage des politiques climatiques. Leur objectif se limite à l'évaluation du coût "brut" des mesures de limitation des émissions de carbone, indépendamment des effets bénéfiques en termes de climat. Pourtant, puisqu'il ne saurait être question d'engager le bien-être présent sans contreparties futures, ils n'aideront à planifier une politique climatique qu'à la condition d'être couplés à une évaluation des dommages évités. Dans une nouvelle version du modèle MR, Manne & alli (1995) vont d'ailleurs dans ce sens en mesurant le coût net de la politique climatique. Grâce à cette démarche, il devient possible d'apprécier quelles réductions des émissions de carbone rechercher pour équilibrer les coûts et les avantages.

Peut-être parce que cela exige une résolution "forward" technique plus coûteuse, liée à l'hypothèse indispensable d'anticipation parfaite des dommages climatiques, peut-être pour d'autres raisons, en tout cas, aucun modèle d'équilibre général appliqué n'explore la question de la politique optimale du climat. Seules des études beaucoup plus agrégées l'ont traitée (Cline, 1992 ; Falk & Mendelsohn, 1993 ; Nordhaus, 1992a, 1993 et 1996 ; Peck et Teisberg, 1992 ; Tahvonen, 1994 ; Williams, 1995). Malheureusement, en contrepartie, ces modèles offrent une description nettement moins fouillée de la formation du coût de dépollution.

La littérature économique pose donc un dilemme puisqu'elle privilégie, en termes de qualité de la représentation des mécanismes économiques, soit le coût de la réduction de émissions, soit les avantages de la lutte contre l'effet de serre. Les concepteurs des modèles

destinés à évaluer la politique optimale du climat résolvent ce problème par un palliatif : puisqu'une description détaillée de la formation du coût de dépollution est difficilement conciliable avec le calcul du dommage marginal de l'effet de serre, ils enrichissent leur analyse des enseignements des modèles d'équilibre général appliqué en ajustant des fonctions de coût à partir des résultats de ces derniers. La présentation de leurs propositions construit la conclusion de ce chapitre. D'une part, elle rappelle les propriétés caractéristiques du coût de la réduction des émissions de carbone. D'autre part, elle montre de quelle manière certains auteurs réconcilient les évaluations agrégées et technico-économiques.

Graphique 2.7 :Exemples de fonctions de coût ajustées



Les fonctions de coût employées par Cline (1994), Nordhaus (1992a) et (1993), Nordhaus & Yang (1996) et Tahvonen (1994) sont de la forme $CT(t) = Y(t).a(t).R(t)^{b(t)}$. Les paramètres $a(t)$ et $b(t)$ sont ajustés à partir des résultats des modèles d'équilibre général appliqué. Leur évolution exogène rend compte implicitement des modifications de la technique de production sans qu'il soit besoin de les modéliser : les substitutions entre l'énergie et les autres facteurs, les substitutions interénergétiques et l'introduction des technologies de remplacement sans carbone.

La fonction de coût de Tahvonen, représentée dans le graphique 2.7, est construite à partir des simulations du modèle de Manne (1993) pour la région O.C.D.E. (hors Etats-Unis). Elle figure bien les propriétés caractéristiques des évaluations des modèles. A court et moyen termes, le coût croît à taux croissant avec la réduction des émissions, du fait d'une offre d'énergies "propres" bornée (l'électricité et les énergies fossiles à faible teneur en carbone) et de la substituabilité imparfaite entre l'énergie finale et les autres facteurs. Ensuite, à mesure que la technologie de substitution sans carbone devient opérationnelle et rentable, le coût d'une même contrainte d'émission diminue (graphiquement, on constate une translation vers le bas des courbes de coût). Alors, le coût croît quasi linéairement avec la baisse des émissions car la back-stop est produite en quantités potentiellement très grandes à un coût marginal constant.

En opposition avec Tahvonen, Nordhaus postule que les paramètres $a(t)$ et $b(t)$ de la fonction de coût ne varient pas au cours du temps. Dans le graphique 2.7, ce parti pris implique que la courbe reste identique à toute date. Il revient en fait à supposer qu'il n'y aura aucune modification notable des techniques de production.

L'opposition méthodologique suscite dévoile les limites du paramétrage des fonctions de coût à partir des modèles d'équilibre général. Implicitement, cette opération revient à supposer que les choix technologiques sont autonomes : ils apparaissent aux dates déterminées par les modèles d'équilibre général, quel que soit le scénario testé. Or, dans les faits, ces décisions résultent de la réunion d'un ensemble de circonstances (le quota d'émission imposé, le prix des énergies fossiles...) et n'auraient pas lieu autrement. Ceci suggère l'existence d'un domaine de validité des fonctions ajustées : elles sont une approximation acceptable à la condition que les situations décrites soient proches des scénarios des modèles d'équilibre général.

Un exemple concret permet d'éclaircir ce point. Tahvonen indique que le coût devient quasi linéaire à partir de 2060, date à laquelle la technologie de remplacement sans carbone est soi-disant rentable. Cette situation caractérise effectivement le modèle MR lorsque la dépollution cible dépasse 50 pour-cent. Cependant, il ne s'applique certainement pas pour les premières

unités de dépollution, i.e. lorsque le coût marginal de la dépollution par les autres méthodes est inférieur au prix seuil d'utilisation de la back-stop. De fait, Tahvonen calcule une chute brutale des émissions dans certaines régions du monde, à partir de 2070, alors que les taux de dépollution antérieurs sont inférieurs à 10 pour-cent, donc insuffisants pour justifier le recours à la technologie de remplacement.

Sachant que, selon ses calculs, la politique optimale nécessite, au plus, un taux de dépollution de 15 pour-cent, l'hypothèse de Nordhaus paraît donc plus appropriée. Par contre, à l'inverse, elle est déconseillée pour étudier des mesures plus contraignantes. En effet, dans ces cas, des taux de dépollution plus grands impulseraient des ajustements économiques qui ne sont pas pris en compte par la fonction de coût “figée” de Nordhaus.

Les deux fonctions précédentes laissent de côté la controverse opposant les partisans d'une évaluation agrégée à ceux qui lui préfèrent une approche technico-économique. Cline construit une “équation de coût synthétique”, qui combine à la fois les deux méthodes. Il suppose que les coûts de la réduction des émissions de carbone sont nuls tant que le taux de dépollution reste inférieur à 22 pour-cent du scénario de politique inchangée. Selon lui, la taxe nécessaire pour rejoindre ce niveau libérerait les agents économiques des coûts de transaction pesant sur leurs choix technologiques et énergétiques, et permettrait des gains d'efficience importants. Par contre, toute réduction supplémentaire des émissions serait coûteuse, mais ce coût diminuerait avec le temps à partir de 2025, date de la mise sur le marché des technologies de remplacement. Pour toute réduction de plus de 22 pour-cent, on aurait ainsi :

- $CT = 0,0678.Y.R$ jusqu'en 2025 ;
- $CT = (0,0678 - 0,00039.t).Y.R$ après.

Annexe 2.1 - Base de données des modèles mondiaux

Nous résumons dans les tableaux suivants les données utilisées pour calibrer les modèles.

Tableau 1 : Hypothèses retenues pour la population (en millions d'habitants)

Pays	1990	2000	2025	2050	2075	2100
Etats-Unis	250	267	289	285	283	284
OCDE (hors EU)	582	617	649	643	640	643
Ex-URSS	289	306	337	351	361	367
Chine	1116	1285	1576	1703	1750	1817
Reste du monde	3024	3701	5339	6546	7143	7310
Total	5261	6176	8190	9528	10177	10421

Souce : EMF n°12

Tableau 2 : Hypothèses retenues pour la croissance économique

Pays	PIB 1990 milliards de \$	Taux de croissance moyens					
		1990-2000	2000-2025	2025-2050	2050-2075	2050-2100	1990-2100
Etats-Unis	5600	2,50	2,00	1,50	1,25	1,00	1,53
OCDE (hors EU)	10200	2,70	2,00	1,50	1,25	1,00	1,55
Ex-URSS	2680	3,60	3,10	2,35	2,10	1,85	2,46
Chine	1100	4,50	4,00	3,50	3,25	3,00	3,53
Reste du monde	3340	3,75	3,30	2,80	2,55	2,30	2,83
Total	22920	3,01	2,50	2,08	1,96	1,85	2,18

Souce : EMF n°12

Annexe 2.2 - Démonstration de (2.4)

Nous partons de la relation de Oliveira-Martins & alli (1993), qui définit la taxe γ prélevée par tonne de carbone nécessaire pour baisser les émissions de R pour-cent:

$$\gamma = \frac{p}{\alpha} \cdot \left[(1-R)^{-\frac{1}{\varepsilon}} - 1 \right] \text{ où } \alpha \text{ mesure la teneur moyenne de l'énergie finale en carbone.}$$

L'expression précédente implique qu'il faut augmenter le prix de l'énergie finale de $\alpha.\gamma$ unités pour respecter le quota d'émission. Le prix de l'énergie vaut donc $p + \alpha.\gamma = p.(1 - R)^{-1/\varepsilon}$. En introduisant cette valeur dans (2.3), on établit la relation (2.4).

Chapitre 3

Dommages climatiques

Le coût économique engagé pour préserver le climat varie très fortement avec l'objectif environnemental fixé. A court terme, la dépendance des systèmes de production vis-à-vis des énergies fossiles rend la réduction des émissions de gaz à effet de serre rapidement très coûteuse. Les gouvernements ne s'engageront pas dans cette voie tant qu'ils ne connaîtront pas, d'une part, la nature et l'ampleur des dommages physiques auxquels leur attentisme les expose et, d'autre part, l'évaluation monétaire de ces conséquences. A moins que des critères extra-économiques n'interfèrent dans leur jugement, ils voudront, au pire, équilibrer les avantages et les coûts des actions entreprises pour ralentir l'effet de serre. L'évaluation des avantages d'une politique du climat, c'est-à-dire la quantification des dommages environnementaux qu'elle permet d'éviter, répond à cette attente.

Dans ce chapitre, nous exposerons les méthodes d'évaluation des dommages climatiques. Dans la première section, nous détaillerons les deux étapes de l'élaboration d'une fonction de dommage climatique. La première consiste à estimer les conséquences d'un doublement de la concentration atmosphérique d'équivalent dioxyde de carbone. Les résultats de cinq études, menées par Nordhaus (1991a), Cline (1992), Fankhauser (1992), Titus (1992) et Tol (1994), seront présentés. Au cours de l'étape suivante, une fonction de dommage, spécifiée arbitrairement, est calibrée sur les estimations précédentes. Sans remettre en question l'utilité des fonctions déterminées, nous nous permettrons, malgré tout, d'énoncer un certain nombre de critiques.

Laissant de côté ce débat, nous avancerons en deux étapes vers la quantification de la politique optimale du climat. Nous étudierons d'abord la notion de dommage par tonne d'équivalent carbone. Celle-ci ne nécessite pas la construction d'un modèle compliqué et donne une idée approximative de la taxe optimale sur les émissions. Ensuite, nous analyserons les modèles de contrôle optimal appliqués de Nordhaus (1992a) et (1993), Peck

& Teisberg (1992), Falk & Mendelsohn (1993) et Tahvonen (1994). Nous ferons le parallèle avec les chapitres précédents, pour tester la cohérence des résultats obtenus et pour mettre un point final à la question de l'interaction entre l'épuisement des énergies fossiles et le climat, soulevée dans le chapitre 1.

3.1 - Construction d'une fonction de dommage climatique

Les dommages physiques dépendent de l'état du climat. A priori, plus le climat se réchauffe, plus l'environnement se dégrade. Toutefois, cette relation n'est pas nécessairement continue et les scientifiques insistent bien sur ce point. L'ampleur des dommages peut croître par paliers, avec des effets de seuil dus à la destruction brutale de certains écosystèmes et au "dérèglement" du climat. Pourtant conscients de cette éventualité, mais confrontés à l'absence de prédition des risques réels et des échéances d'événements majeurs de ce type, les économistes font l'hypothèse d'une relation continue entre le réchauffement et les dommages physiques.

Les dommages économiques seraient donc proportionnels aux modifications climatiques. Ils dépendent aussi de quantités d'autres facteurs. Si le réchauffement réduit la production, les pertes subies dépendent des perspectives de croissance économique. Si le secteur primaire est plus touché que les autres secteurs, son importance présente et future influence les dommages subis. Si les individus sont plus sensibles à la détérioration de l'environnement quand leurs besoins vitaux sont satisfaits, les dommages climatiques perçus augmentent avec leur niveau de vie. La liste est certainement beaucoup plus longue et montre la difficulté de l'évaluation des dommages climatiques.

Pour contourner ces problèmes, les économistes énoncent implicitement deux hypothèses simplificatrices : pour un niveau de réchauffement donné, le dommage est une fonction linéaire du P.I.B. ; pour un niveau de P.I.B. donné, le dommage est une fonction linéaire, quadratique ou cubique de l'élévation de la température moyenne au-dessus de sa valeur naturelle.

La méthode finalement retenue s'avère alors très simple. Il suffit de connaître le dommage en un point unique, pour des niveaux de P.I.B. et de température choisis convenablement, pour extrapoler une fonction de dommage applicable à toute date.

3.1.1 - Dommages du doublement de la concentration d'équivalent CO₂

Faisant écho au scénario scientifique du doublement de la concentration atmosphérique d'équivalent carbone ¹, les économistes étudient généralement un accroissement de la température variant de 1,5 à 4,5 °C. Les projections moyennes prédisent que cette situation devrait être rejointe au milieu du vingt-deuxième siècle.

3.1.1.1 - Méthode

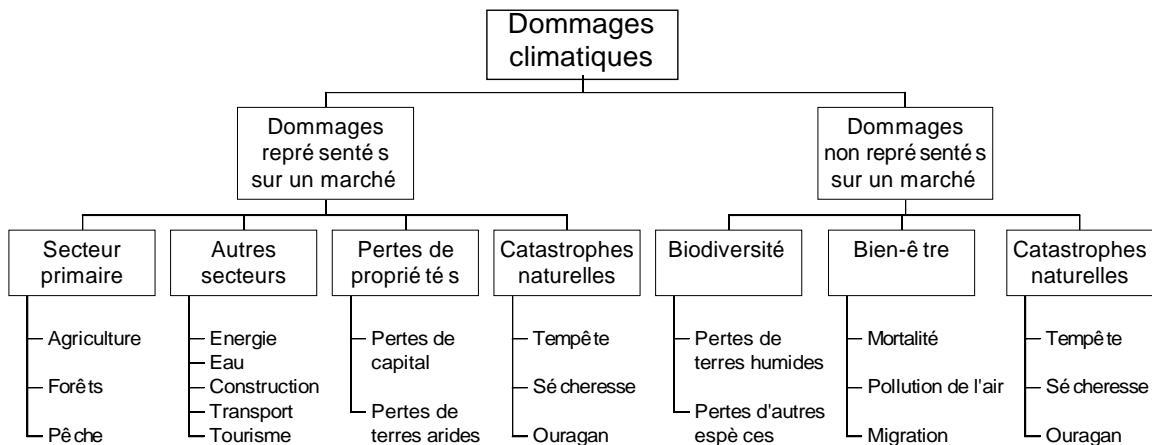
Nordhaus (1991a) est le premier à proposer une quantification complète des effets d'un doublement de la concentration d'équivalent carbone. Bien que très imparfaite, cette première tentative est notable et a inspiré toutes les études ultérieures. La méthode que Nordhaus utilise est dite “méthode par recensement”. Elle consiste à comptabiliser, poste après poste, les effets économiques attendus, pour une amplitude donnée du réchauffement global, en distinguant les secteurs sensibles de l'économie.

Manne & alli (1995) formalisent la méthode initiée par Nordhaus sous la forme d'un schéma, que nous reprenons ici (voir le schéma 1.1). Ils distinguent les dommages climatiques représentés sur un marché de ceux qui ne font pas l'objet d'un échange marchand. Cette typologie découle, d'une part, de l'effet contre-productif du réchauffement, qui implique une baisse du bien-être économique par diminution de la consommation, et, d'autre part, de la perte directe de bien-être ressentie par les agents économiques suite à toute dégradation de l'environnement. Elle s'explique également par des raisons techniques. Alors que les nuisances représentées sur un marché sont facilement évaluées, grâce aux informations contenues dans le prix, les autres ne sont pas directement observables. Ces dernières se

¹ - Voir le chapitre préliminaire.

mesurent par des méthodes d'évaluation indirectes (marchés de substitution, prix hédonistes et évaluation contingente : voir Cropper & Oates (1992), Desaigues & Point (1990a) et Faucheux & Noël (1995)).

Schéma 3.1 : Recensement et classification des dommages de l'effet de serre



Source : Manne et alii (1995)

3.1.1.2 - Extrapolations à partir de l'économie américaine

Les premières études (Nordhaus, 1991a ; Cline, 1992 ; Fankhauser, 1992 ; Titus, 1992) portent sur l'économie américaine uniquement. Dans ces travaux, les auteurs se demandent quelles pertes subiraient l'économie américaine, dans sa taille et sa structure actuelles, si la température s'élevait instantanément de 2,5 degrés Celsius. Cette base leur permet ensuite d'extrapoler le coût économique du réchauffement au moment où il se produira.

Cette méthode exige quelques commentaires. Chaque poste est mesuré en fonction des échelles de valeurs présentes, en dollars de l'année de référence. L'évaluation obtenue, ramenée en pourcentage du P.I.B., définit un taux de dommage qui permet de déduire le dommage imputable à ce même poste pour le niveau de production futur. Cette extrapolation est valable à deux conditions² : la structure sectorielle de l'économie ne doit pas varier ; le

² - Une autre condition serait que les prix relatifs des différents biens produits restent constants. Elle est satisfaite si la première condition est remplie et si les préférences ne changent pas.

dommage subi par une branche doit être proportionnel à sa production. Ces deux hypothèses ne seront pas forcément vérifiées :

- historiquement, la structure sectorielle des économies ne se perpétue pas ;
- il y a lieu de croire que quelques dommages non représentés sur un marché ne sont pas linéairement proportionnels à la production (biodiversité, valeurs d'agrément) ;
- les lois d'Engel conduisent à imaginer que les dépenses de santé et de loisir augmenteront plus rapidement que les revenus, au détriment des dépenses d'alimentation. Comme tous ces secteurs sont très sensibles à la qualité de l'environnement, il est difficile de savoir si la poursuite de la croissance réduira la vulnérabilité des économies à l'effet de serre.

Ces critiques amènent à conclure que ces estimations ne sont pas fiables. Conscient de ce problème, Nordhaus (1991a) suggère de considérer les résultats obtenus sur l'économie américaine comme représentatifs des dommages mondiaux à l'instant du doublement de la concentration en carbone. Il étaye son argumentation sur la croyance selon laquelle la structure sectorielle actuelle de l'économie américaine préfigure l'économie mondiale à l'instant considéré. Si l'on accepte cette hypothèse spéculative, le dommage par unité de P.I.B. que subiraient aujourd'hui les Etats-Unis, si la température moyenne était supérieure de 2,5 degrés Celsius, permet d'extrapoler les pertes mondiales futures par unité de P.I.B.

Cette proposition appelle une seconde remarque. L'extrapolation à partir de l'économie américaine du coût mondial du réchauffement suppose implicitement que l'exposition du territoire américain au réchauffement est représentative du dommage mondial moyen (puisque on sait que les dommages physiques ne sont pas géographiquement uniformes). Rien ne permet de l'affirmer.

Bien que pratique, car elle permet d'échapper à une analyse désagrégée de l'économie et des dommages, l'idée de Nordhaus repose sur un ensemble de suppositions plutôt hasardeuses. Nous présentons malgré cela les résultats obtenus par Cline (1992), Fankhauser (1992) et Titus (1992). Nous rappelons qu'ils reflètent, avant tout, le coût que les Etats-Unis auraient à subir si la température s'élevait brusquement dans les proportions indiquées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Dommages encourus par les Etats-Unis (*Milliards de \$ et % du P.I.B.*)

Auteur Poste	Doublement de la concentration de carbone équivalent			A très long terme
	Cline (2,5°C)	Fankhauser (2,5°C)	Titus (4°C)	
Agriculture	17,5	7,4	1,2	95,0
Recul des forêts	3,3	- 1,8	43,6	7,0
Disparition d'espèces	4,0 + A	6,4		16 + B
Elévation du niveau des mers	7,0	10,7	5,7	35,0
Electricité	11,2	6,8	5,6	64,1
Chauffage non électrique	- 1,3			-4,0
Qualité de la vie	+ C			+ D
Mortalité	5,8	16,6	9,4	33,0
Morbidité	+ E			+ F
Migrations	0,5	0,5		2,8
Ouragans	0,8	0,2		6,4
Secteur de la construction	+/- G			+/- H
Activités de loisirs	1,7			4,0
Eau : approvisionnement et pollution.	7,0	13,7	11,4	56,0
Infrastructures urbaines	0,1			0,6
Pollution atmosphérique	3,5 + K	6,4	27,2	19,8 + L
Climatisation des véhicules			2,5	
Total	61,1+A+C+ E+G+K	66,9	139,2	335,7+B+D+ F+H+L
Pourcentage du P.I.B.	1,1	1,4	2,5	6,1
Année de référence	1990	1988	1990	1990

Source : Cline (1994)

Les principaux postes sont l'agriculture, l'électricité, l'eau, l'élévation du niveau des océans, la mortalité et la disparition d'espèces. Les comptes marqués d'une lettre sont potentiellement sous-estimés. Ils appartiennent systématiquement à la catégorie des dommages non représentés sur un marché.

Même si les ordres de grandeurs sont finalement comparables d'une étude à l'autre, d'importantes différences par postes peuvent être déplorées, notamment pour l'agriculture, les forêts, la mortalité, l'eau et la pollution atmosphérique. Cline (1994) affirme que Fankhauser et Titus sous-estiment les dommages agricoles en accordant trop d'importance à l'effet fertilisant du carbone. Il avance deux arguments : d'une part, il rappelle que les estimations

sont basées sur l'hypothèse d'un doublement de la concentration d'équivalent dioxyde de carbone, les autres gaz à effet de serre étant exprimés dans une unité commune ; d'autre part, la fertilisation par le dioxyde de carbone serait moins importante à ciel ouvert qu'en laboratoire.

Dans son estimation, Titus tient compte de la valeur récréative des forêts, pas les autres. Cette différence, qui montre encore l'importance des dommages touchant les biens non marchands, explique l'écart très important des estimations des nuisances forestières.

La variabilité des estimations concernant le poste mortalité provient des évaluations utilisées pour la valeur d'une vie statistique : 0,6 million de dollars pour Cline ; 1,5 millions de dollars pour Fankhauser. Une simple règle de trois suffit alors pour se rendre compte de la proximité des deux estimations, après harmonisation.

L'observation de ces divergences prouve que des progrès importants restent à faire. Pearce et Fankhauser (1994) expliquent qu'elles sont autant imputables aux incertitudes qui entachent les connaissances scientifiques qu'aux difficultés de l'évaluation monétaire (valeur d'une espèce animale, valeur d'une vie statistique, valeur récréative d'un environnement préservé...) et insistent sur le fait que des recherches supplémentaires dans les deux disciplines sont primordiales.

Cline (1991) met en garde contre l'utilisation systématique du scénario du doublement de la concentration. Il rappelle qu'il ne constitue pas un équilibre stationnaire de l'effet de serre puisque la projection des tendances présentes et les réserves d'énergies fossiles connues laissent penser que cet ordre de grandeur sera largement dépassé. Pour ces raisons, il réalise une estimation des dommages pour un réchauffement de 10 degrés Celsius (dernière colonne du tableau), où 6 pour-cent du P.I.B. seraient perdus (environ 20 pour-cent pour l'hypothèse forte).

3.1.1.3 - Evaluations régionales

L'extrapolation au monde des évaluations basées sur l'économie américaine a très vite été rejetée par de nombreux auteurs. La mesure du dommage obtenue rend éventuellement compte du dommage mondial moyen, pas des inégalités régionales qui pourraient exister. Les évaluations régionales ont une double utilité pour l'analyse économique de l'effet de serre. D'abord, elles sont indispensables à la construction des modèles désagrégés, comme ceux de Manne & alli (1995), Nordhaus & Yang (1996) et Tahvonen (1994). Ensuite, elles permettent de se forger une opinion sur les motivations des pays à agir contre l'effet de serre. Elles pourront donc nous servir ultérieurement pour évaluer les chances de coopération et les conditions d'adhésion des pays à une politique internationale du climat.

La plupart des chercheurs ont d'emblée défendu l'idée d'une inégalité des pays devant les dommages climatiques. D'une part, le réchauffement n'est pas uniforme et croît à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. D'autre part, les économies sont plus ou moins sensibles aux variations climatiques. L'exemple ci-dessous est assez convaincant.

Dans une économie, considérons un secteur n°1, très sensible au réchauffement (le secteur primaire, par exemple), et un secteur n°2, moins vulnérable (agrégat regroupant les autres secteurs). Soit w et $1-w$ leurs coefficients budgétaires respectifs. Soit a_1 et a_2 les parts de l'output perdues par le secteur n°1 et n°2, respectivement, par suite des bouleversements climatiques ; on suppose que $a_1 > a_2$. On montre aisément que le dommage global par unité de P.I.B. est égal à $a = a_2 + (a_1 - a_2)w$. Puisque $a_1 > a_2$, il croît avec le coefficient budgétaire du secteur n°1. Ainsi, deux pays voisins, soumis aux mêmes changements climatiques, subiront un dommage monétaire différent si la structure sectorielle de leurs économies diffère. Le pays le plus spécialisé dans le secteur sensible souffrira plus durement. Dans le tableau 3.1, Cline estime la perte du secteur agricole américain à 10 pour-cent de sa valeur ajoutée ; comme il représente seulement 3 % de la production domestique, il produit un dommage correspondant à 0,3 pour-cent du P.I.B. Or, dans de nombreux pays en développement, ce secteur représente environ 40 pour-cent de la production ; si l'on applique

le même taux de dommage que pour les Etats-Unis, une perte de 4 pour-cent du P.I.B. est subie.

D'autres arguments, en plus du précédent, incitent à anticiper des nuisances seront plus conséquentes dans les pays en développement (Grubb, 1992). Principalement, les problèmes sanitaires, l'approvisionnement en eau et la perte de terres humides expliqueraient ces différences. Fankhauser (1992) réalise une évaluation pour différentes régions. Cette étude est soumise aux mêmes critiques que les précédentes, puisqu'elle utilise le dommage par unité de P.I.B. d'aujourd'hui pour déduire l'incidence future.

Tableau 3.2 : Dommages régionaux (*Milliards de \$ et % du P.I.B.*)

Poste	Région	C.E.	E.-U.	Ex-URSS	Chine	NON-OCDE	OCDE	Monde
Défense des côtes		0,1	0,2	0,0	0,0	0,9	0,5	1,4
Pertes en terres sèches		0,3	2,1	1,2	0,0	5,9	8,1	14,0
Pertes en terres humides		4,9	5,6	1,2	0,6	15,7	15,9	31,6
Pertes d'espèces biologiques		7,1	6,4	2,6	1,5	10,9	17,3	28,2
Agriculture		9,7	7,4	6,2	7,8	16,0	23,1	39,1
Sylviculture		-4,1 ^c	-1,8	-2,9	1,1	-0,8	-10,0	-10,8
Pêcherie ^a								
Energie								
Eau		14,1	13,7	3,0	1,6	11,9	34,8	46,7
Autres secteurs		?	?	?	?	?	?	?
Aménités		7,0	6,8	-0,7	0,7	3,0	20,1	23,1
Mortalité		22,0	16,6	3,9	7,3	32,0	57,3	89,3
Pollution atmosphérique		3,5	6,4	2,1	0,2	3,5	11,9	15,4
Migration		1,0	0,5	0,2	0,6	2,3	2,0	4,3
Risques naturels ^b		0,0	0,2	0,0	0,2	2,1	1,1	3,2
Total		65,6	64,1	16,8	21,6	103,1	182,1	285,2
% du P.I.B.		1,5	1,3	0,7	6,1	1,8	1,4	1,5

Notes :

a) La perte pêcherie est comprise dans la perte de terres humides.

b) Ouragans seulement.

c) Les nombres négatifs indiquent des avantages.

Source : Fankhauser (1992)

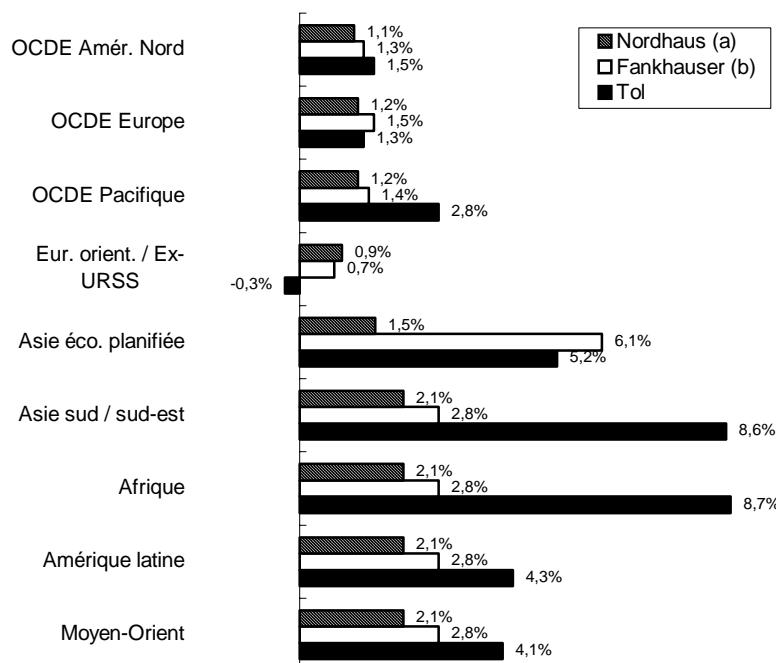
Avant de commenter les particularités régionales, notons que les résultats de Fankhauser ne permettent pas de rejeter la proposition de Nordhaus. Il s'avère effectivement que les Etats-Unis peuvent être vus, approximativement, comme représentatifs de la sensibilité mondiale au

réchauffement global. Ce pays est supposé subir une perte égale à 1,3 pour-cent de son P.I.B., proche du dommage total, évalué à 1,5 pour-cent du P.I.B. mondial.

En valeur absolue, du fait de l'écart de développement entre les deux régions, la zone O.C.D.E. subirait le plus gros dommage : 182,1 milliards de dollars, contre 103,1 milliards de dollars pour le reste du monde. Par contre, en pourcentage du P.I.B., le classement est renversé et les pays hors O.C.D.E. perdent le plus. Si l'on exclut l'ex-U.R.S.S., qui est relativement épargnée, les nuisances atteignent 2,8 pour-cent du P.I.B. des pays non-membres de l'O.C.D.E. restants.

D'autres études traitent de l'évaluation des dommages régionaux. Tol (1994) utilise une ventilation géographique plus précise. Il confirme globalement les résultats de Fankhauser mais son découpage géographique met en évidence de très fortes disparités régionales. Nordhaus & Yang (1996) utilisent une répartition relativement plus égalitaire des dommages. L'ensemble de ces informations est réuni dans le graphique 3.1. Il prouve que l'étude des dommages climatiques est loin d'être un thème de recherche stabilisé et que des progrès restent à faire.

Graphique 3.1 : Evaluations des dommages régionaux : Comparaison



(a) : Nordhaus & Yang considèrent six régions : E.-U. ; C.E. ; Japon ; Ex-URSS ; Chine ; Reste du monde.

(b) : Fankhauser considère cinq régions : voir le tableau 3.2.

Remarque : lorsque les données désagrégées ne sont pas disponibles, c'est la valeur régionale moyenne qui est utilisée.

3.1.2 - Fonctions de dommage climatique

La fonction de dommage détermine les coûts économiques subis pour différents niveaux de réchauffement. L'unique information disponible pour la construire est la valeur du dommage pour une augmentation de la température de 2,5 degrés Celsius. Il est donc nécessaire, pour la compléter, de formuler une hypothèse sur son allure générale. Ce choix est en grande partie arbitraire, mais il n'y a pas d'autre possibilité en l'état actuel des connaissances. Quelques intuitions peuvent, par contre, le guider. De toute évidence, il existe une corrélation positive entre le dommage et la température. En outre, il y a de grandes chances pour que les dommages augmentent plus vite que la température, au moins au-delà de certaines valeurs. L'argument qui étaye cette intuition est cynique : la Vie disparaît si la température est trop élevée.

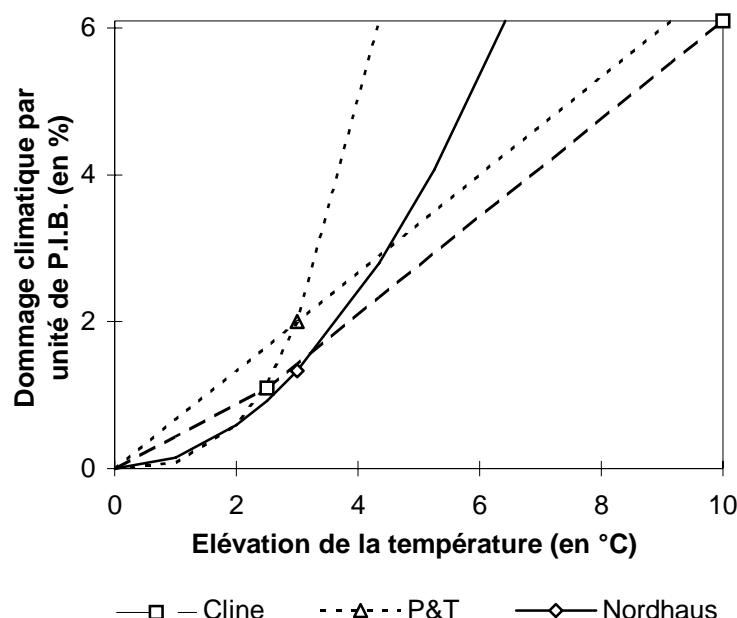
Les modèles économiques conçus pour déterminer la politique optimale du climat prévoient une fonction de dommage linéaire (Peck et Teisberg, 1992 ; Tahvonen, 1994), quadratique (Nordhaus, 1992a, 1993, 1996 ; Manne et alii, 1995) ou cubique (Peck et Teisberg, 1992). Ces fonctions sont calibrées de manière à coïncider avec le dommage du doublement de la concentration d'équivalent carbone. Ce dernier diffère selon les auteurs, comme le rappelle le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Calibrages des fonctions de dommage

Auteur	Température (en °C)	Dommage (en % du P.I.B.)
Cline	2,5	1,1
Nordhaus	3	1,33
Peck&Teisberg	3	2

Le graphique 3.1 contient deux informations. Les marques (losange, carré et triangle) indiquent les points retenus par les auteurs pour calibrer leur fonction de dommage. Les courbes montrent l'allure de la fonction (linéaire, quadratique ou cubique) ³.

³ - A l'exception de Cline, qui évalue le dommage en deux points, pour un réchauffement de 2,5 et 10 °C.

Graphique 3.2 : Fonctions de dommage utilisées dans la littérature

3.1.3 -Critiques

Les évaluations des dommages du doublement de la concentration d'équivalent carbone souffrent de nombreuses insuffisances. Certaines ont déjà été notées au cours de notre présentation. Avant de nous intéresser à l'exploitation qui peut être faite des fonctions de dommage obtenues, et donc de les accepter malgré leurs défauts, il y a d'autres limites que nous aimerais souligner. La première concerne l'exploitation qui est faite par les économistes des prédictions des modèles de circulation générale et la prise en compte de l'incertitude. La seconde critique revient sur les hypothèses simplificatrices sur lesquelles reposent les évaluations. Elle conduit à proposer une approche certes plus complexe de la question mais, à coup sûr, beaucoup plus précise.

3.1.3.1 - Prise en compte de l'incertitude

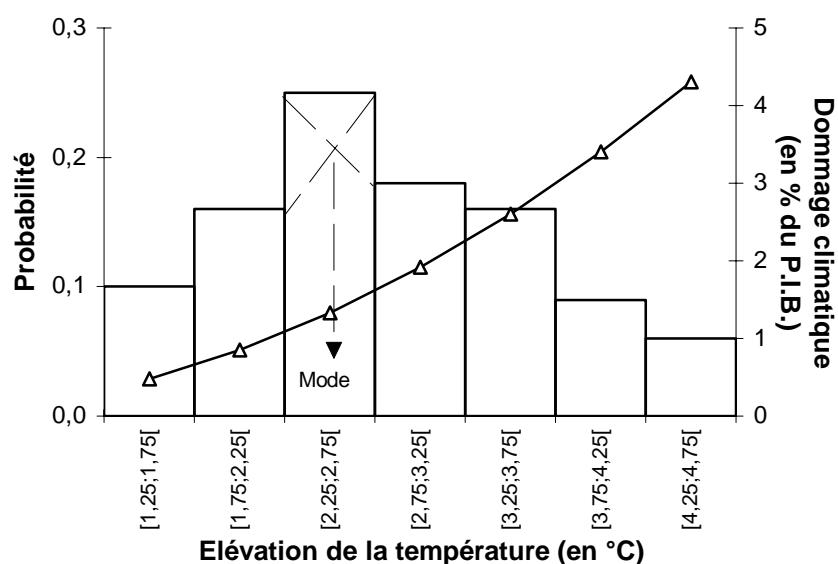
Les modèles de circulation générale prévoient le réchauffement sous la forme d'un encadrement. Pour le cas du doublement de la concentration d'équivalent carbone, la

température s'accroît d'une valeur comprise entre 1,5 °C et 4,5 °C. Le mode de cette distribution représente la réalisation la plus probable ; il est égal à 2,5 °C.

L'amplitude de cet intervalle a des conséquences importantes sur l'évaluation des dommages. Il est évident qu'un accroissement de 4,5 degrés Celsius est sans comparaison, du point de vue des effets sur la planète, avec un accroissement de 1,5 degrés Celsius. Il est donc regrettable que la littérature économique ait délaissé ces questions. A part une tentative de Fankhauser & Pearce (1994), ayant pour objet de déterminer les conséquences de l'incertitude sur l'évaluation économique des dommages, les économistes se sont le plus souvent contentés de proposer une évaluation de meilleure conjecture, autrement dit pour la valeur la plus probable de l'intervalle.

Fankhauser & Pearce expliquent qu'une telle évaluation sous-estime le dommage réel pour deux raisons. D'une part, la distribution de probabilité des températures pour le doublement du carbone est asymétrique et biaisée vers la droite. D'autre part, le dommage croît à taux croissant avec la température. Le graphique 3.3 permet de comprendre le raisonnement de Fankhauser & Pearce (les données de cette illustration numérique fictive figurent dans l'annexe 3.1).

Graphique 3.3 : Espérance mathématique du dommage climatique



Le graphique 3.3 superpose deux informations. L'histogramme représente la distribution de probabilité de l'élévation de la température, consécutive à un doublement de la concentration d'équivalent carbone (le mode est égal à 2,5 degrés Celsius environ). Il est important de constater qu'elle est dissymétrique. La courbe indique le dommage subi pour chaque classe (la fonction de dommage utilisée est celle de Nordhaus).

Sur la base de cet exemple, il est aisément de démontrer la proposition de Fankhauser & Pearce. Le dommage de meilleure conjecture s'obtient en considérant que la température modale se réalisera effectivement ; il est égal à 1,33 pour-cent du P.I.B. La valeur espérée du dommage climatique est égale à la somme des dommages pour toutes les températures possibles, pondérés par leurs probabilités de réalisation. En utilisant les données du graphique 3.3, on l'évalue à 1,84 % du P.I.B.

Fankhauser & Pearce critiquent également la non prise en compte, dans les estimations, des risques de catastrophes majeures. Ceux-ci accroissent l'espérance du dommage sous la forme d'un risque faible, mais non nul, associé à un coût très important. Des descriptions scientifiques de scénarios catastrophiques (fonte des glaces polaires, dégagement massif de méthane, déviation du Gulf Stream...) ont été développées mais cette approche reçoit, pour l'instant, relativement peu d'écho dans la recherche économique. Pourtant, Howarth & Manahan (1992) pensent que les catastrophes naturelles imprévisibles représentent la principale source d'inquiétude en matière de variation climatique. Dans ces conditions et compte tenu de la fiabilité réduite des évaluations des dommages prévisibles, ils estiment que toute politique du climat devrait être jugée par référence à l'idée d'assurance contre la catastrophe.

3.1.3.2 - Equilibre partiel contre équilibre général

Une autre critique qui peut être adressée aux estimations présentées plus haut est qu'elles sont le fruit d'un raisonnement en équilibre partiel. Les pertes sont évaluées aujourd'hui et appliquées au futur. Avec cette méthode, tout se passe comme si la date à

laquelle ce réchauffement sera subi et le temps qui nous en sépare n'influaient pas le résultat, ce qui est faux.

En fait, cette méthode est valable à condition que l'économie prise comme référent soit un reflet acceptable de l'économie future, sur laquelle s'appliqueront réellement les nuisances énumérées. Or, ceci ne sera pas le cas. Une analyse d'équilibre générale doit être menée pour prévoir les ajustements économiques consécutifs aux bouleversements climatiques progressifs (Scheraga & alli, 1993) : un recul du secteur agricole, une réattribution des dépenses publiques, une modification des habitudes de consommation et des rapports de prix entre les différentes catégories de biens...

Reilly & Hohmann (1993) illustrent bien les risques d'erreurs dus à l'utilisation des analyses d'équilibre partiel. En opposition avec la plupart des évaluations des dommages agricoles, qui isolent l'effet sur un pays donné, leur modèle simule le marché mondial des denrées agricoles. Sachant que le réchauffement global aura des effets positifs ou négatifs, suivant les régions du globe, cette approche s'avère beaucoup plus pertinente, car elle tient compte de la transmission par le marché mondial de tous les effets régionaux. Les évaluations obtenues par cette méthode suggèrent que les études locales surestiment fortement les dommages agricoles.

3.2 - Dommage par tonne et taxation optimale

Depuis le chapitre 1, on sait que, à l'optimum, la dernière unité de gaz à effet de serre émise laisse le bien-être inchangé : l'émission marginale égalise l'utilité tirée d'une plus grande consommation au dommage supplémentaire subi. Or, jusqu'à présent, l'émission de gaz carbonique était gratuite, ce qui fait que, en principe, son utilité marginale était nulle. En conséquence, si le dommage marginal de l'effet de serre est positif, le comportement d'émission actuel est sous-optimal. Il reste à déterminer la valeur du dommage marginal pour mesurer de combien il faudrait réduire les rejets de carbone.

Une application numérique très simple permet d'en obtenir une mesure approximative. Nous utilisons les projections du P.I.B. mondial et des émissions de carbone jusqu'en 2100 obtenues par les modèles d'équilibre général du chapitre 2. Ensuite, nous appliquons les

relations (1), (2) et (3) du chapitre préliminaire pour déduire l'évolution du climat pour le siècle à venir⁴ ; l'accroissement de la température serait de l'ordre de 3,1 degrés Celsius en 2100. A l'aide de la fonction de dommage de Nordhaus (par exemple), on calcule alors la somme actualisée des dommages sur la période considérée. On répète ensuite les opérations précédentes en incrémentant l'émission de 1990 d'une tonne. La différence entre les deux estimations donne une évaluation du dommage de la dernière unité de carbone émise. Le dommage marginal en 1990 serait donc de l'ordre de 3, 6 ou 16 dollars par tonne, selon que l'on utilise un taux d'actualisation de 7, 5 et 3 pour-cent respectivement.

Les émissions de carbone en 1990 seraient donc trop importantes puisque l'utilité de la dernière unité est nulle, alors que le dommage de cette même unité est positif. Cependant, ce dernier est modéré et laisse à penser que la lutte contre l'effet de serre ne nécessite pas une mesure drastique : l'imposition d'une taxe de l'ordre de 3 à 16 dollars par tonne impliquerait une hausse du prix du pétrole brut de 1 à 6 pour-cent seulement (au cours de 20 dollars par baril) ; l'augmentation du prix de l'énergie dans ces proportions réduirait les émissions de carbone de 5 à 10 pour-cent (voir le chapitre 2).

La méthode ci-dessus a l'avantage d'être simple mais elle ne permet pas de calculer la taxe optimale sur les émissions. Pour parvenir à l'évaluer, il faut construire un modèle de contrôle optimal et le calibrer. Nordhaus (1992a) et (1993) fait encore figure de pionnier dans ce domaine. D'autres études ont prolongé son analyse mais elles restent peu nombreuses (Falk & Mendelsohn, 1993 ; Nordhaus & Yang, 1996 ; Peck & Teisberg, 1992 ; Tahvonen, 1994 ; Williams, 1995). Les politiques optimales qu'elles proposent sont assez proches et un consensus semble émerger. Nous ferons le bilan de ces résultats dans une première sous-section.

Pour des raisons que nous avons déjà discutées, les recherches se sont essentiellement focalisées sur le dioxyde de carbone. Mais, la politique du climat n'est pas complète si elle n'agit pas simultanément sur les autres gaz à effet de serre. L'idée est donc apparue de se

⁴ - Nous tenons compte des autres gaz à effet de serre sous la forme d'une émission supplémentaire en 1990 de 2 Gt d'équivalent carbone, croissant de 0,5 pour-cent par an ensuite.

servir du dioxyde de carbone comme étalon de mesure, puis d'exprimer les autres gaz par rapport à ce dernier. Le facteur de conversion dépend, essentiellement, des caractéristiques physiques du gaz : sa durée de vie atmosphérique et son forçage radiatif. Les scientifiques construisent un index de comparaison des gaz à effet de serre basé sur ces caractéristiques. Nous verrons dans une seconde sous-section que celui-ci n'est pas opérationnel pour calculer les taxes applicables aux autres gaz à partir de celle du carbone.

3.2.1 - Taxe optimale sur le carbone

3.2.1.1 - Description des modèles de contrôle optimal appliqués

Les données de base nécessaires à la construction d'un modèle de contrôle optimal des émissions de carbone sont réunies dans les graphiques 2.7 et 3.2. Les fonctions de coût, ajustées à partir des modèles d'équilibre général appliqués, permettent de déduire la réaction optimale des économies à l'élévation du prix des émissions. Les fonctions de dommage rendent possible l'évaluation de la taxe optimale sur le carbone.

Les modèles de Nordhaus (1992a) et (1993), de Falk & Mendelsohn (1993) et de Tahvonen (1994) utilisent ces informations. Toutefois, ils diffèrent sur plusieurs points. Les deux derniers s'appuient sur une trajectoire de référence exogène pour la production et les émissions futures. Les coûts de la politique et les dommages climatiques sont calculés à partir de cette projection, définie comme l'évolution qu'aurait suivie l'économie sans aucune modification climatique.

Les différentes versions du modèle DICE de Nordhaus (1992a) et (1993) vont plus loin dans la modélisation de l'économie. La production dépend du progrès technique et de deux facteurs, à savoir le travail et le capital. Le premier intrant est une proportion fixe de la population et résulte uniquement des projections démographiques. Par contre, l'accumulation du capital est traitée comme dans le modèle de Ramsey. Bien que les émissions de carbone soient vues comme un sous-produit, Nordhaus rend compte de la baisse tendancielle de l'intensité énergétique de manière exogène. Les effets des réductions des émissions de

carbone et du réchauffement réduisent la production ainsi définie, de la même façon que dans les deux modèles susdits.

La représentation du système productif par Nordhaus est plus performante car elle fait dépendre la trajectoire potentielle de l'ampleur de la politique climatique, via le comportement d'accumulation. A l'inverse, les deux autres modèles ont le défaut de supposer implicitement que le sentier de croissance reste inchangé, quelles que soient les actions entreprises aujourd'hui pour limiter les émissions de carbone.

Le modèle de Peck & Teisberg (1992) diffère sensiblement des autres. Il s'inspire du modèle Global 2100 de Manne (1990), ce qui fait qu'il endogénise non seulement la production, mais également la formation du coût économique de la réduction des émissions de carbone. La production dépend du travail, du capital et de l'énergie finale. Une description détaillée de la branche énergétique permet de décrire les substitutions interénergétiques et l'apparition des technologies de remplacement. Peck & Teisberg adjoignent à Global 2100 un module climatique précis qui prend en compte quatre gaz à effet de serre (les autres modèles convertissent les autres gaz en équivalent carbone, ce qui est moins satisfaisant). L'ensemble de ces éléments laisse à penser qu'il s'agit du travail le plus performant des quatre.

3.2.1.2 - Résultats des modèles de contrôle optimal

Comme nous allons le montrer, les insuffisances de certains des modèles ne transparaissent pas dans les résultats. Nous pensons que cela provient du fait que la politique du climat n'exige pas une réduction substantielle des émissions de carbone.

Tous les modèles s'accordent pour dire qu'il n'est pas optimal de réduire fortement les émissions de carbone. Selon les calculs de Nordhaus (1992a), le taux de dépollution, i.e. la baisse des émissions en pourcentage par rapport au scénario de référence, partirait de 10 pour-cent, en 1995, pour atteindre 15 pour-cent, en 2100. Tahvonen (1994) propose des valeurs légèrement inférieures, avec une dépollution passant de 6 à 12 pour-cent sur la même période.

Les résultats de Peck & Teisberg (1992) encadrent ces valeurs⁵ : lorsque la fonction de dommage est linéaire, le taux de contrôle des émissions est très faible et inférieur à 5 pour-cent ; lorsque le dommage est cubique (hypothèse extrême), la réduction des émissions atteint 50 pour-cent environ en 2100 ; dans tous les cas, les émissions ne divergent pas réellement de la trajectoire de politique inchangée avant 2030 (autrement dit, il ne serait pas nécessaire d'agir avant cette date).

L'effort de dépollution le long de la trajectoire optimale étant faible, on doit s'attendre à ce que la taxe sur les émissions ne soit pas très élevée. Sur ce sujet également, on constate un relatif consensus. Nordhaus (1992a) obtient une taxe optimale variant de 5 à 20 dollars par tonne de carbone entre 1995 et 2100. Falk & Mendelsohn (1993) testent de nombreuses hypothèses sur les valeurs des paramètres de leur modèle. Il est donc difficile de choisir laquelle comparer aux résultats des autres modèles. On note toutefois que la taxe est comprise entre : 0,69 et 5,56 dollars par tonne en 1990 ; 1 et 170 dollars par tonne en 2100. La taxe optimale déterminée par Peck & Teisberg varie fortement selon la spécification de la fonction de dommage : de 5 dollars par tonne, en 1990, à 20 dollars par tonne, en 2100, avec un dommage linéaire ; de 5 dollars par tonne, en 1990, à 208 dollars par tonne, en 2100, lorsque la fonction de dommage est cubique (mais cette hypothèse est exagérée : voir le graphique 3.2)⁶.

Remarque 3.1 : Le modèle de Peck & Teisberg (1992) formalise explicitement l'épuisement des énergies fossiles. Il nous permet de mettre un point final au débat que nous soulevions, au cours du chapitre 1, sur l'évolution temporelle de la taxe optimale sur les émissions de carbone. La raréfaction des énergies fossiles implique que l'émission de carbone décroît fortement à partir du vingt-deuxièm!mpce siècle, mais la taxe continue à augmenter pour plusieurs raisons : l'inertie climatique des océans fait que la baisse de la pollution n'est pas

⁵ - Rappelons que la fonction de dommage de Nordhaus est quadratique, celle de Tahvonen est linéaire.

⁶ - Une taxe de 208 dollars par tonne correspond au seuil de rentabilité de la technologie de remplacement sans carbone du modèle MR. A partir de cette valeur, chaque unité de dépollution supplémentaire est obtenue à un prix constant, par substitution des combustibles synthétiques par cette technologie.

ressentie immédiatement dans l'évolution de la température ; la croissance économique maintient les dommages à un niveau élevé.

Remarque 3.2 : Le modèle de Williams (1995) est un peu à part. Williams se désintéresse de la réduction des émissions et calcule la taxe optimale sur les émissions le long de la trajectoire de politique inchangée. Il justifie cette démarche en avançant l'argument des coûts de transaction associés à la gestion d'un système de taxe sur le carbone, qu'il estime entre 22 et 50 dollars par tonne de carbone pour les Etats-Unis. Donc, la limitation des émissions s'impose seulement si la taxe optimale sur le carbone dépasse ce seuil de rentabilité, ce qui n'est pas le cas dans son analyse. De même que Falk & Mendelsohn (1993), Williams explore un grand nombre de configurations, en faisant varier les paramètres de la fonction de dommage climatique et le taux d'actualisation. Il détermine un intervalle assez large pour la taxe optimale : 0,11 à 2,48 dollars par tonne de carbone en 1990 ; 0,53 à 94,07 dollars par tonne en 2200. A en croire son évaluation des coûts de transaction, ces valeurs sont effectivement insuffisantes pour justifier une politique de réduction des émissions, au moins initialement.

Les estimations des différents modèles se marient plutôt bien. Cette homogénéité s'explique surtout par la faible intensité de la politique optimale. Si les dommages climatiques avaient requis une restriction plus forte des émissions, on peut penser que les écarts se seraient creusés, reflétant la capacité de chaque modèle à représenter les ajustements économiques successifs. Le paramétrage du coût de dépollution définit le domaine de validité du modèle : le modèle de Nordhaus ne peut pas étudier des réductions fortes des émissions, car sa fonction de coût ne tient pas compte des nouvelles technologies énergétiques ; par opposition, la fonction de Tahvonen s'applique mal à une dépollution faible, car elle incorpore, de manière autonome, des modifications qui n'apparaissent, en principe, qu'à partir d'un certain niveau.

3.2.2 - Comparaison des gaz à effet de serre

Une définition des facteurs de conversion entre les différents gaz à effet de serre est indispensable aux négociations internationales sur le climat. Elle trouverait un premier emploi

dans la comptabilité des contributions nationales à l'effet de serre et aiderait ainsi à définir les objectifs de dépollution nationaux. Elle fournirait une grille de conversion pour déduire les taxes à appliquer aux autres gaz à partir de la taxe sur le carbone. Dans le cadre d'un marché des droits de pollution, elle établirait les termes d'échange entre les permis de polluer.

La Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992) pose très clairement le problème. Les signataires du traité voudraient que « le calcul ... des quantités de gaz à effet de serre émises ... s'effectue sur la base des meilleures connaissances scientifiques disponibles, notamment en ce qui concerne ... la contribution effective de chacun de ces gaz aux changements climatiques ».

La définition des facteurs de conversion doit reposer sur des critères objectifs. La logique défendue par les rédacteurs de la Convention est la recherche de la plus grande efficacité en termes de dommages évités. Par contre, il n'est pas précisé si la notion de dommage doit être entendue en termes physiques ou en termes de bien-être. Bien sûr, c'est cette seconde option que nous allons défendre.

Les scientifiques proposent de se baser sur le potentiel de réchauffement global pour déterminer les poids relatifs des gaz à effet de serre. Ils se mesurent en faisant le rapport du réchauffement intertemporel résultant de l'accumulation d'une tonne de chaque gaz sur la même mesure dans le cas du dioxyde de carbone (Eckaus, 1992) :

$$w_i = \frac{\int_0^{\infty} x_i(t) \cdot F_i(t) dt}{\int_0^{\infty} x_{CO_2}(t) \cdot F'_{CO_2}(t) dt}, \quad (3.1)$$

où

$x_i(t)$ est la proportion du gaz i restant à la date t ,

$F_i(t)$ est le forçage radiatif instantané du gaz i .

Si le forçage radiatif et le recyclage des gaz accumulés sont des fonctions linéaires des concentrations atmosphériques, alors :

$$w_i = \frac{f_i}{f_{CO_2}} \cdot \frac{\beta_{CO_2}}{\beta_i}, \quad (3.2)$$

où f_i/f_{CO_2} mesure le forçage radiatif relatif instantané du gaz i par rapport au dioxyde de carbone.

Preuve : voir l'annexe 3.2.

La définition scientifique des coefficients de conversion ne coïncide pas avec l'efficience économique. En premier lieu, selon celle-ci, il est équivalent d'accroître la température de 1 degré Celsius aujourd'hui ou plus tard ; ceci est en contradiction avec le principe d'actualisation. En second lieu, elle ne prend en considération que les dommages physiques (le réchauffement subi) et néglige la question de l'évaluation monétaire du dommage.

L'efficacité économique requiert de traiter chaque gaz à effet de serre en fonction de son incidence future sur le bien-être. Ainsi, si l'émission de z tonnes d'un gaz à effet de serre quelconque a les mêmes conséquences sur le bien-être futur que l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone, chaque tonne de ce gaz émise devrait donner lieu au paiement d'une taxe égale à z fois la taxe sur les émissions de gaz carbonique.

Pour faire simple, supposons que : l'utilité est une fonction linéaire de la consommation ; toute la production est consommée ; le dommage climatique augmente de façon linéaire avec la température et avec la production.

En utilisant le modèle climatique de base (voir l'encadré 1 du chapitre préliminaire), on obtient un modèle de contrôle optimal simple, semblable à celui du chapitre 1. Nous reléguons la présentation complète et la résolution de ce modèle à l'annexe 3.3, pour ne pas surcharger notre discussion.

La taxe optimale sur les émissions du gaz i est égale à :

$$p_i^*(t) = a.r.\omega \int_t^\infty F_i(\tau) \left[\int_\tau^\infty Y(s) e^{-(\delta+r)(s-\tau)} ds \right] e^{-(\delta+\beta_i)(\tau-t)} d\tau. \quad (3.3)$$

où

$Y(t)$ est le P.I.B. à la date t ,

δ est le facteur d'actualisation,

a est le dommage, en pourcentage du P.I.B., quand la température est supérieure de 1 degré Celsius à son niveau préindustriel,

Les autres données sont des paramètres climatologiques (voir l'encadré 1).

Preuve : voir l'annexe 3.3.

La taxe optimale dépend des paramètres climatologiques (les paramètres r, ω, F_i', β_i), de la sensibilité de l'économie aux variations climatiques (le taux de dommage a), du niveau de développement et des perspectives de croissance (la projection du P.I.B. $Y(t)$). En faisant les mêmes hypothèses que pour établir la relation (3.2) et en supposant en plus que $Y(t) = e^{n.t}$, on démontre que la taxe optimale sur le gaz i est :

$$p_i^*(t) = \frac{r.\omega.f_i}{\delta + \beta_i - n} \cdot \frac{a}{\delta + r - n} \cdot e^{n.t}. \quad (3.4)$$

Preuve : voir l'annexe 3.3.

En faisant le rapport de la taxe de chaque gaz à effet de serre et de celle du carbone, on obtient une définition économique des poids relatifs des gaz à effet de serre:

$$w_i = \frac{f_i}{f_{CO_2}} \cdot \frac{\delta + \beta_{CO_2} - n}{\delta + \beta_i - n}. \quad (3.5)$$

Ces coefficients dépendent donc également de variables économiques. Le facteur d'actualisation attribue un poids relatif plus important aux gaz ayant une durée de vie courte.

A l'inverse, la croissance démographique et économique accroît le poids relatif des gaz à longue espérance de vie, qui réduisent proportionnellement un bien-être futur plus grand⁷.

Tableau 3.4 : Poids relatifs des gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	Durée de vie (a)	Forçage radiatif relatif instantané (a)	Potentiel de réchauffement global (b)	$\delta - n = 0,01$ Poids relatif (c)	$\delta - n = 0,02$ Poids relatif (c)
CO ₂	120	1	1	1	1
CH ₄	10	58	5	10	14
N ₂ O	150	206	258	227	219
HCFC-22	15	5440	680	1301	1778
CFC-11	65	3970	2150	2867	3179
CFC-12	130	5750	6229	5958	5883
CFC-113	70	3710	2164	2801	3066

(a) : Source : Houghton & alli (1990)

(b) : Calculé à partir de (3.2)

(c) : Calculé à partir de la relation (3.5).

Il ressort du tableau 3.4 que l'actualisation nette, i.e. la différence entre le taux d'actualisation et le taux de croissance, accroît le poids relatif des gaz dont la durée de vie est plus courte que le dioxyde de carbone, et inversement.

La comparaison des gaz à effet de serre est analysée plus complètement par Hoel & Isaksen (1993) et par Reilly & Richards (1993). Hoel & Isaksen utilisent notamment les vraies fonctions de forçage radiatif pour le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde d'azote (nous utilisons des approximations linéaires de ces fonctions). Il s'ensuit que le forçage radiatif relatif instantané de ces gaz par rapport aux autres, et de ces gaz entre eux, n'est pas constant, mais dépend de l'évolution de leur concentration atmosphérique, donc des émissions anthropogéniques. Plus précisément, puisque leur forçage radiatif instantané $F_i(G)$ est décroissant et que leur concentration devrait continuer à augmenter, leur poids relatif par rapport aux autres gaz est surestimé par nos calculs.

⁷ Notons au passage que les pays évaluent différemment les poids relatifs des gaz à effet de serre dès lors qu'ils n'anticipent pas le futur de la même façon (les perspectives de croissance). De ce fait, la définition des équivalences entre les gaz à effet de serre donnera forcément lieu à une négociation internationale.

D'autre part, il est probable que la fonction de dommage de l'effet de serre soit croissante à taux croissant (quadratique par exemple). Si tel est le cas, les gaz ayant une durée de vie longue deviennent relativement plus dommageables que les autres ; leur poids relatif devrait donc augmenter par rapport à nos estimations. Ceci est confirmé par les calculs de Hoel & Isaksen (1993) et de Reilly & Richards (1993).

3.3 - Conclusion

L'évaluation des dommages climatiques pose de nombreux problèmes. En amont, la première difficulté provient des incertitudes scientifiques. Les modèles de circulation générale prédisent l'ampleur du réchauffement moyen avec une marge d'erreur importante ; l'intervalle d'erreur est encore plus important lorsqu'il s'agit de fournir des informations sur les conséquences régionales du réchauffement. Partant de cette base de données peu fiable, de laquelle elle ne retient que les réalisations les plus probables, l'évaluation économique ajoute son lot d'approximations et d'incertitudes. Notamment, l'hypothèse simplificatrice, selon laquelle les dommages estimés aujourd'hui donnent une bonne idée des dommages futurs, à un facteur d'échelle près, mériterait d'être abandonnée au profit d'une approche d'équilibre général. Malgré leurs insuffisances, signe que beaucoup reste à faire, les premières estimations du dommage climatique apportent une aide précieuse à la décision.

Selon les estimations disponibles à ce jour, le coût d'un doublement de la concentration atmosphérique en équivalent carbone varierait de 1 à 2,5 pour-cent du P.I.B. mondial. De fortes disparités régionales existeraient. Schématiquement, les pays en développement seraient les plus vulnérables et subiraient un dommage double par rapport aux pays de l'O.C.D.E. La vulnérabilité des pays en développement proviendrait surtout de leur plus forte dépendance vis-à-vis du secteur agricole, de problèmes d'approvisionnement en eau et des terres cédées à la mer du fait de l'élévation du niveau des océans.

L'évaluation des dommages climatiques pour le doublement de la concentration atmosphérique en carbone sert ensuite de point de calibrage d'une fonction de dommage

climatique. Selon les chercheurs, celle-ci est généralement supposée linéaire, quadratique ou cubique ; la seconde hypothèse est la plus fréquente. La fonction obtenue, introduite dans un modèle de croissance, permet de trouver la taxe optimale sur les émissions de carbone. Tous les auteurs s'accordent à dire qu'elle devrait être faible. Elle augmenterait continûment, partant de 5 dollars par tonne, environ, en 1995, pour atteindre 20 dollars par tonne, environ, en 2100. Le taux de dépollution, par rapport à la trajectoire de politique inchangée, ne dépasserait pas 15 pour-cent. En conclusion, les résultats des modèles suggèrent d'agir modérément, voire pas du tout si, comme le suggère Williams (1995), la gestion bureaucratique de la politique du climat est trop coûteuse (entre 22 et 50 dollars par tonne de carbone aux Etats-Unis selon ses calculs).

Cet optimisme n'est pas partagé par tous. Notamment, Cline (1992) détermine une politique optimale beaucoup plus drastique, principalement en raison de la valeur qu'il retient pour le taux d'actualisation. Bien que son choix soit explicitement critiqué dans la littérature (Nordhaus, 1993), son étude a l'avantage de rappeler la forte sensibilité de la politique du climat vis-à-vis de ce paramètre. A ce titre, l'application numérique proposée au début de la section 3.2 est parlante : le dommage par tonne émise en 1990 vaut environ 3 dollars lorsque le taux d'actualisation est de 7 pour-cent, contre environ 16 dollars lorsqu'il est égal à 3 pour-cent. Ceci invite à la prudence, mais ne constitue pas en soi une raison valable pour mettre en doute les conclusions de la littérature.

Pearce & Fankhauser (1994) critiquent le consensus qui ressort des modèles de croissance optimale de façon plus convaincante. Selon eux, le traitement de l'incertitude et des risques de catastrophes majeures dans ces études, qui consiste à éliminer ces deux dimensions en supposant que la réalisation de meilleure conjecture est celle qui surviendra effectivement, introduit un biais dans le sens d'une sous-estimation des dommages. Leur argumentation repose sur : la forme de la distribution de probabilité des dommages, « asymétrique et biaisée vers la droite » ; la forme de la fonction de dommage, croissante à taux croissant ; les risques de catastrophes majeures. Ils illustrent leur propos en évaluant les dommages climatiques par tonne d'émission dans plusieurs scénarios plus ou moins probables. Leurs résultats suggèrent que « la prise en compte de la possibilité de catastrophes climatiques dans l'avenir accroît ces

valeurs [les dommages par tonne d'émission] dans une proportion considérable qui, dans le pire des cas, atteint 50 pour-cent. » (Pearce & Fankhauser, 1994, page 89).

La deuxième partie de notre thèse reprend ce débat mais l'envisage de façon théorique. Elle décrit la réaction optimale de l'économie face à la crainte d'une catastrophe climatique. Dans le chapitre 4, le problème de l'incertitude sera laissé de côté : l'échéance de la catastrophe, définie par un seuil critique de pollution, ainsi que son incidence seront supposées connues. Bien que peu réaliste dans le contexte scientifique présent, ce scénario a plusieurs qualités. Premièrement, il anticipe les progrès scientifiques dans la connaissance du système climatique et dégage les conditions économiques d'acceptation d'une catastrophe prévue. Deuxièmement, il redéfinit la politique du climat comme une stratégie visant non seulement à limiter les dommages d'une évolution graduelle de l'équilibre climatique, mais aussi à repousser ou éviter les effets catastrophiques. Nous montrerons que : lorsque la catastrophe n'est pas trop dommageable, l'optimalité économique requiert seulement de retarder la catastrophe, pour atténuer la perception présente du dommage encouru, en vertu du facteur d'actualisation, mais de la provoquer tout de même ; dans le cas contraire, il peut être indiqué d'imposer une norme de pollution maximale, égale au seuil critique. Le chapitre 5 introduira en plus le problème de l'incertitude. Deux cas de figure seront étudiés, selon que l'incertitude portera sur la gravité de la catastrophe ou sur son échéance. A condition que les risques de catastrophes soient réels (et ressentis tels), nous montrerons que cette approche modifie potentiellement les conclusions de la littérature.

Annexe 3.1 - Données du graphique 3.3

Température	[1,25;1,75[[1,75;2,25[[2,25;2,75[[2,75;3,25[[3,25;3,75[[3,75;4,25[[4,25;4,75[Sommes
Probabilité	0,10	0,16	0,25	0,18	0,16	0,09	0,06	1,00
Dommage	0,48	0,85	1,33	1,92	2,61	3,40	4,31	
Dom. espéré	0,048	0,136	0,333	0,345	0,417	0,306	0,259	1,84

Annexe 3.2 - Potentiel de réchauffement global

Partons de la relation d'Eckaus (1992) et supposons que le forçage radiatif des gaz à effet de serre est de la forme $F_i(t) = f_i \cdot G_i(t)$ et qu'ils sont recyclés de façon exponentielle, i.e. $x_i(t) = e^{-\beta_i t}$. Le ratio du potentiel de réchauffement global du gaz i par rapport à celui du gaz carbonique devient :

$$w_i = \frac{f_i \cdot \int_0^{\infty} e^{-\beta_i t} dt}{f_{CO_2} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\beta_{CO_2} t} dt} = \frac{f_i / \beta_i}{f_{CO_2} / \beta_{CO_2}}.$$

Annexe 3.3 - Résolution du modèle

Le problème se pose de la manière suivante :

$$\max_{g(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot Y(t) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^N C_i (g_i(t)) - a \cdot \Delta T(t) \right) dt$$

sous les contraintes

$$\dot{G}_i(t) = \alpha_i \cdot g_i(t) - \beta_i \cdot G_i(t), \quad i = 1, \dots, N,$$

$$\Delta \dot{T}(t) = r \cdot \left[\omega \cdot \sum_{i=1}^N F_i(G_i(t)) - \Delta T(t) \right],$$

$$G_i(0) = G_{i,0},$$

$$\Delta T(0) = \Delta T_0,$$

$Y(t)$ est une projection du P.I.B. donnée (trajectoire de politique inchangée sans dommages climatiques).

Remarque :

- N désigne le nombre de gaz à effet de serre considérés ;
- $C_i(g_i(t))$ représente le coût de la réduction des émissions du gaz i , en pour-cent du P.I.B.

Le Hamiltonien s'écrit :

$$\tilde{H} = Y(t) \left[1 - \sum_{i=1}^N C_i(g_i) - a \cdot \Delta T \right] - \sum_i p_i \cdot (\alpha_i \cdot g_i - \beta_i \cdot G_i) - q \cdot r \left[\omega \cdot \sum_i F_i(G_i) - \Delta T \right].$$

Les conditions d'optimalité sont :

$$C'_i(g_i) \cdot Y = \alpha_i \cdot p_i, \text{ avec } i = 1, \dots, N,$$

$$\dot{p}_i = (\delta + \beta_i) \cdot p_i - r \cdot \omega \cdot F'_i(G_i) \cdot q, \text{ avec } i = 1, \dots, N,$$

$$\dot{q} = (\delta + r) \cdot q - a \cdot Y.$$

On en déduit :

$$q^*(t) = a \cdot \int_t^\infty Y(\tau) \cdot e^{-(\delta+r)(\tau-t)} d\tau,$$

$$p_i^*(t) = r \cdot \omega \cdot \int_t^\infty F'_i(G_i(\tau)) \cdot q^*(\tau) \cdot e^{-(\delta+\beta_i)(\tau-t)} d\tau.$$

Si le forçage radiatif est linéaire, i.e. $F_i(G_i(t)) = f_i$, et si la production est donnée par

$Y(t) = e^{n \cdot t}$, alors on a :

$$q^*(t) = \frac{a \cdot e^{n \cdot t}}{\delta + r - n},$$

$$p_i^*(t) = e^{(\delta+\beta_i)t} \cdot \frac{a \cdot r \cdot \omega \cdot f_i}{\delta + r - n} \cdot \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta_i-n)\tau} d\tau = \frac{r \cdot \omega \cdot f_i}{\delta + \beta_i - n} \cdot \frac{a}{\delta + r - n} \cdot e^{n \cdot t}.$$

Partie II

Discontinuités, irréversibilités

et incertitudes

Chapitre 4

Catastrophes climatiques irréversibles

Dans la présentation scientifique de l'effet de serre, nous avons insisté sur le fait que les dommages climatiques pourraient prendre deux formes :

1. des dommages qui augmentent graduellement avec le réchauffement ;
2. des catastrophes majeures qui apparaissent brutalement.

La plupart des scientifiques et quelques économistes estiment que les conséquences brutales d'un réchauffement global sont beaucoup plus à craindre que les dommages graduels : « Bien que le changement climatique soit un phénomène progressif et lent, certaines de ses conséquences peuvent survenir brusquement ou sur une période de temps courte. » (Roe & alli, 1994, p. 224) ¹. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas d'affirmer si des catastrophes majeures (déviation des courants marins, pertes biologiques, fonte des glaces polaires...) ont des chances tangibles de survenir mais ces risques doivent, malgré tout, être considérés avec sérieux.

Confrontée à ceux-ci, l'Humanité décidera implicitement de les provoquer ou de s'en préserver en modifiant en conséquence son émission globale de gaz à effet de serre. Elle devra tenir compte, dans son choix, du caractère irréversible de sa décision : une fois qu'elle aura été appliquée, ses conséquences ne pourront plus être annulées (Arrow et Fisher, 1974).

Le problème des décisions irréversibles en matière d'aménagement de l'environnement (construction d'un barrage, déforestation, extinction d'une espèce) est amplement traité dans la littérature pour le cas où les conséquences sont incertaines (Arrow et Fisher, 1974 ; Henry, 1974 ; Fisher & Hanemann, 1987 ; pour une synthèse, voir Desaigues & Point, 1990a). Dans

¹ - « Although climate change is a gradual and slow process, some of its impacts may occur abruptly or over a short period of time ».

le cas des pollutions cumulatives, l'irréversibilité provient de l'existence d'un seuil critique de pollution dont le dépassement implique un brusque changement de la nature et/ou de l'ampleur des dommages (Pethig, 1991b ; Mäler, 1991 ; Gottinger, 1991 ; Roe et al., 1994 ; Clarke et Reed, 1994). Les analyses économiques s'occupant de ces questions restent rares. De plus, les approches sont souvent très différentes.

Les écologistes préconisent le respect de ces seuils environnementaux et veulent qu'ils soient érigés en norme. Mäler (1991, p. 73) objecte que « si le dommage physique est infini dans le sens qu'il implique la destruction définitive d'un écosystème donné, il ne s'ensuit pas nécessairement que le dommage social mesuré en termes économiques soit infini »². Autrement dit, une option économique ayant des conséquences catastrophiques pour l'environnement n'est pas nécessairement rejetée, mais soumise, comme tout projet, à un arbitrage coût-avantage. L'objet de ce chapitre sera donc de trouver un cadre de réflexion capable de guider les décideurs confrontés à de telles situations.

Roe & alii (1994) développent un modèle où le fait d'atteindre une concentration atmosphérique critique de gaz à effet de serre incertaine produit une perte constante de bien-être pour toutes les périodes subséquentes. En certitude, ils postulent que le système économique doit maintenir la concentration atmosphérique en deçà de cette valeur afin de préserver l'environnement. Ils montrent que cette norme environnementale est contraignante si l'utilité marginale associée au fait de stabiliser indéfiniment la pollution à son niveau critique est supérieure au dommage marginal intertemporel correspondant. Ce résultat leur sert ensuite pour analyser le cas d'un seuil critique incertain. De notre point de vue, leur analyse du cas certain est incomplète. Nous prouverons, d'ailleurs, qu'il peut être optimal, dans certains cas, de transgresser la norme environnementale posée.

Pethig (1991b) analyse la même question dans le cas de polluants persistants, i.e. non recyclés par l'environnement. Le scénario qu'il imagine décrit la situation où l'utilité de la consommation serait réduite d'une valeur constante x à partir d'un seuil de pollution critique.

² - « If the physical damage is infinite because a certain ecological system is irreversibly destroyed, it does not follow that the social damage measured in economic terms is infinite. »

Pethig compare l'attitude consistant à préserver l'environnement, donc à rejoindre la pollution critique et à s'y maintenir indéfiniment, et celle consistant à passer le seuil critique. Il montre que, si la destruction de l'environnement est préférable, « la trajectoire optimale coïncidera avec celle obtenue pour $x = 0$ [i.e. sans conséquences catastrophiques] puisque la translation de la fonction d'utilité laisse les propriétés marginales de la fonction d'utilité inchangées » (Pethig, 1991b, p. 97) ³. Les conditions d'optimalité ne renseignent donc pas sur l'option qui doit être choisie. Par contre, puisqu'elles ne changent pas, Pethig prétend que la trajectoire suivie avant la catastrophe est la même quel que soit l'objectif.

Gottinger (1991) pose un problème similaire et parvient au même résultat. Il énonce une condition supplémentaire à la décision de provoquer la catastrophe : cette option n'est jamais désirable si le bien-être intertemporel obtenu en maintenant indéfiniment la pollution à sa valeur critique est supérieur au bien-être postérieur à la catastrophe.

La solution présentée par Pethig et Gottinger n'est pas satisfaisante. Bien qu'il soit vrai que la perspective d'une catastrophe écologique future ne modifie pas les conditions marginales d'optimalité de la période qui la précède, il est erroné d'en déduire que la trajectoire de la première phase est inchangée. La méthode de résolution utilisée dans ce chapitre montrera, en effet, que la présence d'une catastrophe modifie les conditions de transversalité du problème, donc le sentier d'approche du seuil critique de pollution.

Le découpage de l'horizon temporel en deux périodes, l'une avant et l'autre après la catastrophe, est la principale nouveauté par rapport aux études précédentes. Partant de là, la définition d'une valeur d'héritage, représentant les conséquences de la catastrophe, résume toute l'information nécessaire pour résoudre le problème. La formalisation du problème est décrite dans la première section du chapitre.

Passant outre le cas trivial d'un seuil critique non contraignant (supérieur à la pollution stationnaire du problème n°1), nous chercherons, dans la seconde section, la réaction optimale

³ - « The optimal time path will coincide with that for $x=0$ because the parametric shift in the welfare function leaves unaffected the marginal properties of the welfare function. »

de l'économie face à la menace climatique. Naturellement, deux options antinomiques et concurrentes scindent la question ; d'ailleurs, la résolution du modèle part de ce découpage. La “stratégie de préservation”, ou d'évitement de la catastrophe, consiste à imposer une norme environnementale égale au seuil de pollution pour se préserver, à jamais, de la catastrophe ; elle est donc conforme aux souhaits des écologistes. La stratégie de passage consiste à franchir le seuil critique à une date finie, donc à subir la catastrophe. Notre démarche, au cours de la section 2, sera la suivante : trouver la meilleure stratégie de préservation ; trouver sa concurrente, c'est-à-dire la meilleure stratégie de passage ; les comparer l'une à l'autre.

Dans la section suivante, nous prolongerons le raisonnement théorique par une interprétation plus littéraire. Nous montrerons que la stratégie de préservation sera choisie dans le cas de catastrophes majeures, tandis que sa concurrente est plus attractive pour des risques réduits. Nous discuterons de la rationalité de la stratégie de passage qui consiste, en fait, à choisir le délai optimum avant de subir la catastrophe. Ce résultat est, intuitivement, beaucoup plus satisfaisant que ceux de Pethig et Gottinger.

Dans la troisième section, nous décrirons certains éléments du modèle. Nous donnerons une signification plus précise à la fonction d'héritage, en montrant qu'elle résulte d'un second programme économique, débutant à l'instant où la catastrophe est subie. Nous montrerons également que le prix implicite de la pollution subit, à l'instant de passage, un saut de discontinuité : juste avant, il est relativement élevé, car il faut retarder la catastrophe ; après, cette motivation disparaît et le prix implicite décroît brutalement.

Nous conclurons ce chapitre par une application numérique conçue pour prouver la supériorité de notre proposition, à savoir la stratégie de passage optimale, sur celle de Gottinger.

4.1 - Production - Pollution - Catastrophe irréversible

Pour étudier la réaction optimale de l'économie devant la menace d'une catastrophe écologique irréversible, nous transformons le problème n°1 en introduisant un seuil critique de réchauffement et de concentration atmosphérique, les deux étant synonymes dans notre modèle, puisque $\Delta T(t) = \xi(G(t))$ ⁴. Tant que la concentration atmosphérique reste inférieure à cette valeur, le modèle est identique à celui du problème n°1. Dès que celui-ci est atteint, une catastrophe non spécifiée est subie et réduit de manière irréversible le bien-être. Nous supposerons que le planificateur anticipe parfaitement la catastrophe. Nous considérons donc un problème de commande optimale avec horizon temporel libre (l'instant terminal T est endogène), fonction d'héritage (la valeur $W(\underline{G})$) et contrainte sur la variable d'état (4.1e) :

Problème n°3⁵:

$$\max_{g(t), T} \int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt + e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G}) \quad (4.1)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t), \quad (4.1a)$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)), \quad (4.1b)$$

$$G(0) = G_0, \quad (4.1c)$$

$$g(t) \geq 0, \quad \forall t, \quad (4.1d)$$

$$G(t) \leq \underline{G}, \quad \forall t \in [0, T], \quad (4.1e)$$

$$T \in [0, \infty[. \quad (4.1f)$$

Les fonctions communes aux problèmes n°1 et n°3 gardent les mêmes propriétés que dans le problème n°1.

⁴ - Nous rappelons que cette relation ne reflète pas fidèlement la réalité, puisque l'inertie climatique des océans n'est pas introduite (voir le chapitre préliminaire pour obtenir des précisions).

⁵ - Le problème n°3 permet d'étudier toutes les hypothèses possibles. Nous reviendrons seulement à la fin du chapitre sur la signification précise et sur la détermination de la fonction d'héritage.

\underline{G} est le seuil critique de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Nous supposons bien entendu que $G_0 < \underline{G}$. A l'instant T , la catastrophe est subie et le bien-être intertemporel total est augmenté de l'héritage $W(\underline{G})$ (en valeur courante). Sa valeur dépend du seuil critique et des conséquences économiques de la catastrophe.

La trajectoire suivie après la catastrophe et la valeur d'héritage correspondante étant connues, le planificateur se préoccupe uniquement de la première phase, avant l'instant de transition T . Il en détermine la durée (de zéro à une infinité de périodes lorsque la catastrophe est jugée trop préjudiciable et est donc repoussée indéfiniment) et choisit l'évolution temporelle de la mesure de dépollution pendant cet intervalle.

4.2 - Résolution ⁶

On forme le Hamiltonien courant :

$$\tilde{H}(G, g, p) = u(f(g, G)) - p \cdot (g - \beta \cdot G) + \lambda(\underline{G} - G). \quad (4.2)$$

Soit $(\langle G^*(t), g^*(t) \rangle, T^*)$ la solution du problème posé. Alors, il existe $p(t)$ continue et dérivable par morceaux, et la solution optimale respecte les conditions suivantes :

$$f_g(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)) = p, \quad (4.3)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + f_G(g^*, G^*) \cdot u'(f(g^*, G^*)) - \lambda, \quad (4.4)$$

avec $\lambda \geq 0$, $\underline{G} - G \geq 0$ et $\lambda(\underline{G} - G) = 0$.

Proposition 4.1 : Compte tenu de la contrainte sur la variable d'état (4.1e), la dérivée (4.4) peut ne pas exister en certains points dits de jonction. Les dates concernées sont en nombre fini par hypothèse. Les instants initial et final peuvent en faire partie. Aux points de jonction

⁶ - Voir l'appendice 1.

τ_j , $j = 1, \dots, n$, la variable adjointe subit éventuellement un saut de discontinuité donné par (Léonard & Long, 1992, théorème 10.3.1., pp. 334-335) :

$$p(\tau_j^-) - p(\tau_j^+) = \eta(\tau_j), \text{ avec } \eta(\tau_j) \geq 0 \text{ et } \eta(\tau_j)(\underline{G} - G(\tau_j)) = 0.$$

4.2.1 - Deux attitudes concurrentes

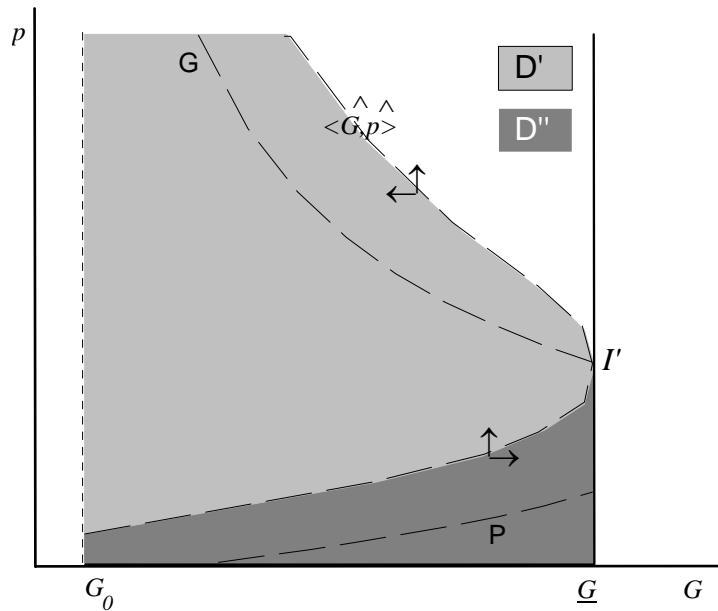
Nous notons $\langle G(t), p(t) \rangle$ toute trajectoire faisable et admissible à la fois (voir le glossaire). Nous appelons trajectoire de préservation toute trajectoire faisable telle que $T = \infty$. Soit D' l'ensemble des trajectoires de préservation :

$$D' = \left\{ \langle G(t), p(t) \rangle_{t \in [0, \infty[} \middle| G(0) = G_0; G(t) \leq \underline{G} \right\}.$$

Par opposition, est appelée trajectoire de passage toute trajectoire telle que T prend une valeur finie. Soit D'' l'ensemble des trajectoires de passage :

$$D'' = \left\{ \langle G(t), p(t) \rangle_{t \in [0, T]} \middle| G(0) = G_0; G(t) \leq \underline{G}; 0 \leq T < M \right\}.$$

Graphique 4.1 : Sous-ensembles de trajectoires faisables



Dans le graphique 4.1, nous représentons les ensembles D' et D'' . Tant que $G < \underline{G}$, la contrainte (4.1a) et les conditions (4.3) et (4.4) sont identiques à leur homologue du problème n°1. Les lemmes 1.1 et 1.2 s'appliquent donc et les isoclines G et P ont les mêmes propriétés que dans le problème n°1. Les ensembles D' et D'' sont séparés par la trajectoire faisable $\langle \hat{G}, \hat{p} \rangle$ (en pointillés dans le graphique).

A chacune des deux stratégies que nous avons définies peut être associée une infinité de trajectoires faisables. Dans les sous-sections 4.2.2 et 4.2.3, nous sélectionnerons dans ces deux ensembles la trajectoire qui est optimale parmi ses semblables. Nous définirons donc une trajectoire de préservation et une trajectoire de passage optimales, chacune étant la meilleure du point de vue du bien-être, compte tenu de sa problématique propre. Dans la sous-section 4.2.4, la comparaison des bénéfices tirés de chacune d'elle nous indiquera laquelle devrait être choisie.

4.2.2 - La meilleure stratégie de préservation

Soit $\langle G', p' \rangle \in D'$ la trajectoire optimale du programme restreint aux trajectoires de préservation, i.e. aux éléments de D' . Cette trajectoire de préservation optimale est solution du sous-problème particulier défini par un horizon temporel infini.

Lemme 4.1 : La trajectoire de préservation optimale respecte la condition de transversalité suivante (Léonard & Long, corollaire 10.3.1 du théorème 10.3.2) ⁷ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p'(t) \cdot [G'(t) - G(t)] \geq 0, \quad (4.5)$$

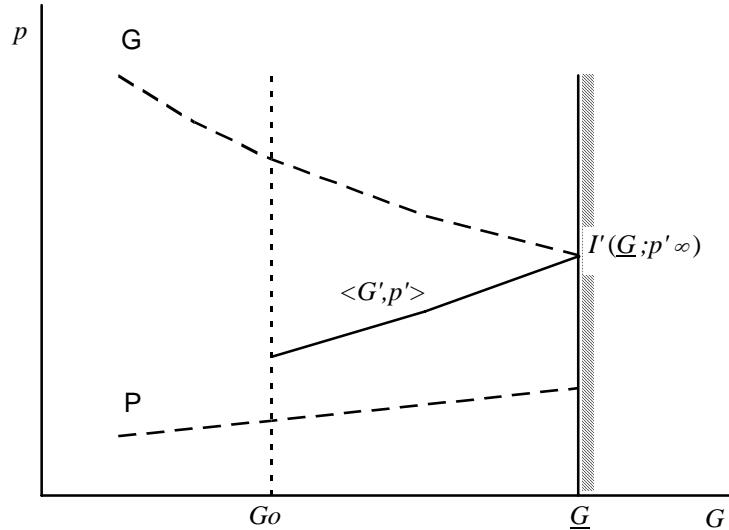
pour toute trajectoire faisable $G(t)$.

⁷ - Nous rappelons ici que nous avons implicitement changé le signe de la variable adjointe du modèle pour faciliter l'interprétation. Ceci a pour effet de modifier la condition de transversalité de la façon suivante : $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot \pi'(t) \cdot [G(t) - G'(t)] \geq 0$, où $\pi(t)$ est la variable adjointe avant le changement de signe, devient

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p'(t) \cdot [G'(t) - G(t)] \geq 0, \text{ avec } p(t) = -\pi(t).$$

Pour trouver la trajectoire $\langle G', p' \rangle$, nous empruntons le raisonnement de Léonard & Long (1992) pour un problème approchant (exemple 10.3.2., pp. 338-340). Appliqué à notre cas, il nous amène à affirmer que la trajectoire optimale du problème n°3 limité à D' est la trajectoire $\langle \hat{G}, \hat{p} \rangle$ stoppée en I' . Ce point est situé à l'intersection de la droite $G = \underline{G}$ et de l'isocline G . Léonard & Long (1992, p. 340) avancent l'explication suivante : « L'intuition sous-jacente à cette supposition est que l'état stationnaire est hors de portée et qu'un substitut doit être trouvé »⁸.

Graphique 4.2 : Trajectoire de préservation optimale



Théorème 4.1 : La trajectoire de préservation optimale conduit l'économie de l'état initial à l'état stationnaire situé à l'intersection de la frontière de préservation $G = \underline{G}$ et de l'isocline G . Le point stationnaire est rejoint à une date finie θ .

⁸ - « The intuition behind this guess is that the steady state is now out of bounds and a substitute must be found ». L'état stationnaire auquel il est fait référence est pour nous celui du modèle du problème n°1, hors d'atteinte à double titre dans notre cas : la contrainte (4.1e) et la problématique du seuil critique.

Preuve : Puisque le point $I'(\underline{G}; p'_\infty)$ est au-dessus de l'isocline \mathbf{P} , on a $\dot{p} > 0$. Il n'est donc pas stationnaire. Mais, lorsque le système atteint le point I' , la contrainte (4.1e) est serrée et il existe $\lambda > 0$ tel que $\dot{p} = 0$ (voir la relation (4.4)). A cette condition, ce point devient l'équilibre stationnaire du problème restreint. On prouve ensuite l'optimalité de cette trajectoire en prouvant qu'elle satisfait le lemme 4.1. Puisque toutes les trajectoires faisables sont bornées par 0 et \underline{G} , on a en effet $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p'_\infty \cdot [\underline{G} - G(t)] \geq 0$.

4.2.3 - La meilleure stratégie de passage

Soit $\langle G'', p'' \rangle \in \mathbf{D}''$ et T'' la solution optimale du problème restreint aux trajectoires de passage, i.e. à l'ensemble \mathbf{D}'' .

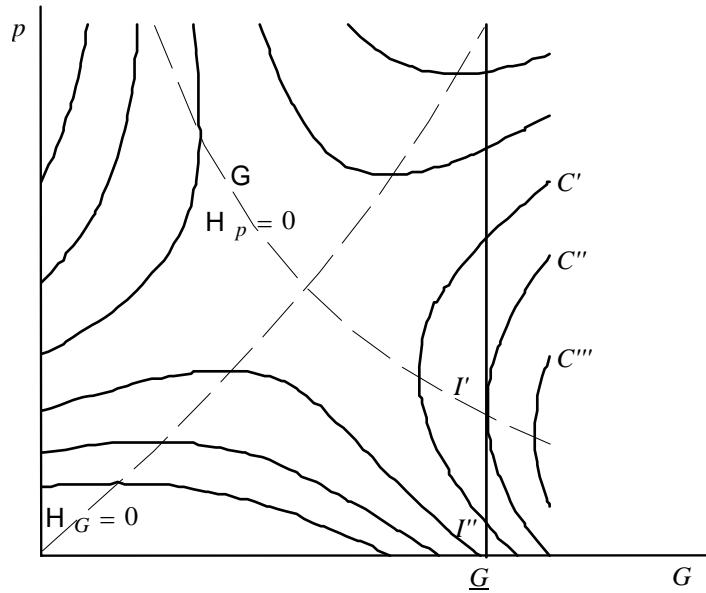
Lemme 4.2 : La trajectoire de passage optimale satisfait les conditions de transversalité (Léonard & Long, théorèmes 7.6.1 et 10.3.2) :

$$\tilde{H}^0(\underline{G}, p''_T) = \delta \cdot W(\underline{G}), \quad (4.6a)$$

$$p''_T \geq 0. \quad (4.6b)$$

Preuve “heuristique” : Voir l'annexe 4.1.

Graphique 4.3 : Carte des iso-hamiltoniens



La trajectoire de passage optimale est nécessairement sous la trajectoire \$\langle G', p' \rangle\$ strictement (voir le graphique 4.1). Son état terminal \$(\underline{G}, p''_T)\$ vérifie le lemme 4.2. Nous utilisons le graphique 4.3 pour montrer que la condition (4.6a) du lemme 4.2 admet zéro, une ou deux racines. Les courbes représentées sont le lieu des points où le Hamiltonien maximisé \$\tilde{H}^0(G, p)\$ est constant dans le plan \$(G, p)\$ (voir l'annexe 4.2). Dans la démonstration qui suit, nous utilisons les “iso-hamiltoniens” qui prennent \$C'\$, \$C''\$ et \$C'''\$ pour valeurs. On démontre que \$C' > C'' > C'''\$ ⁹.

Cas n°1 : Si \$C' = \delta.W(\underline{G})\$, l'iso-hamiltonien \$C'\$ et la droite \$G = \underline{G}\$ ont deux points communs. Leurs coordonnées vérifient le lemme 4.2. Celui situé au-dessus de l'isocline \$\mathbf{G}\$ ne nous intéresse pas car aucune trajectoire de passage ne peut l'atteindre (voir le graphique 4.1). Seul le point \$I''\$ doit être retenu.

⁹ - Sachant que \$\tilde{H}_p^0 = -\dot{G}\$ et que tout point au-dessus de \$\mathbf{G}\$ est tel que \$\dot{G} < 0\$, et inversement, il s'ensuit que \$\tilde{H}^0(G, p)\$ croît avec \$p\$ au-dessus de \$\mathbf{G}\$, et inversement. Pour \$G\$ donné, \$\tilde{H}^0(G, p)\$ prend donc sa valeur minimum sur l'isocline \$\mathbf{G}\$. Ainsi, tout iso-hamiltonien ayant au moins un point qui ne soit pas à la verticale d'un autre iso-hamiltonien a une valeur plus grande que ce dernier.

Cas n°2 : Si $C'' = \delta.W(\underline{G})$, l'iso-hamiltonien correspondant et la droite $G = \underline{G}$ ont un unique point commun respectant le lemme 4.2 (dans le graphique, ce point est confondu avec I' , c'est-à-dire le point terminal de la trajectoire $\langle G', p' \rangle$).

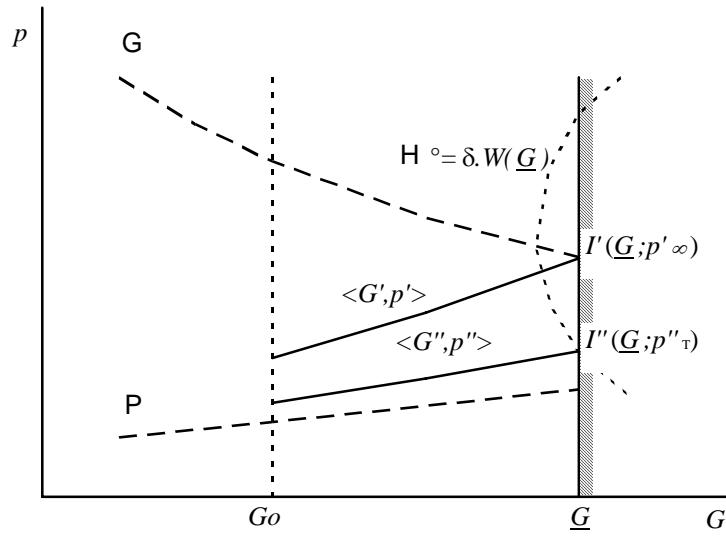
Cas n°3 : Si $C''' = \delta.W(\underline{G})$, la condition de transversalité (4.6a) n'admet pas de solution.

Remarque 4.1 : Ces résultats restent valables quelle que soit la position de la contrainte environnementale $G = \underline{G}$.

Le lemme 4.2 détermine entièrement la trajectoire de passage optimale $\langle G'', p'' \rangle$. Dans les deux premiers cas, il définit l'état terminal (\underline{G}, p''_T) du système. Celui-ci engendre de manière unique la trajectoire optimale. Elle conduit l'économie de l'état initial $(G_0, p''(0))$ à lui-même. Le temps nécessaire pour transférer le système de l'un à l'autre est T'' . Dans le troisième cas, il n'existe pas de point de passage respectant la condition (4.6a) et on ne peut pas trouver de solution au problème n°2 issue de l'ensemble \mathbf{D}'' .

Théorème 4.2 : La trajectoire de passage optimale, si elle existe, conduit l'économie de l'état initial à l'état (\underline{G}, p''_T) , avec $p''_T \geq 0$ tel que $\tilde{H}^0(\underline{G}, p''_T) = \delta.W(\underline{G})$. Ce point est rejoint à une date optimale T'' finie.

Graphique 4.4 : Trajectoire de passage optimale



4.2.4 - Laquelle choisir ?

Le graphique 4.4 représente les deux réponses possibles à la catastrophe. Pour savoir celle qui doit être choisie, il faut comparer les bénéfices nets des deux politiques. Le théorème 4.3 détermine définitivement ce choix.

Théorème 4.3 : Si le bien-être intertemporel associé à l'action de maintenir indéfiniment une pollution égale au seuil critique est plus grand que l'héritage, la politique de préservation optimale est solution du problème n°3. Réciproquement, si cette valeur est plus petite que l'héritage, la politique de passage optimale existe et est solution du problème n°3.

Preuve : pour $G = \underline{G}$ fixé, le Hamiltonien maximisé est minimum au point stationnaire I' de la politique de préservation optimale : quel que soit p , on a $\tilde{H}^0(\underline{G}, p) \geq \tilde{H}^0(\underline{G}, p_\infty)$. Cet état stationnaire procure un bien-être intertemporel courant égal à $u(C'_\infty)/\delta$, où C'_∞ est la consommation stationnaire correspondante, et on a $\tilde{H}^0(\underline{G}, p_\infty) = u(C'_\infty)$.

Si le bien-être stationnaire de la politique de préservation optimale est supérieur à l'héritage, i.e. si $u(C'_\infty)/\delta > W(\underline{G})$, il est préférable de rester en I' indéfiniment. En outre, dans ce cas,

on a $\tilde{H}^0(\underline{G}, p'_\infty) > \delta \cdot W(\underline{G})$. Dès lors, puisque le Hamiltonien est minimum en ce point, il n'existe pas de valeur de p vérifiant $\tilde{H}^0(\underline{G}, p) = \delta \cdot W(\underline{G})$ et la politique de passage optimale n'existe pas (en fait, elle est confondue avec la trajectoire de passage optimale).

Si le bien-être stationnaire de la politique de préservation optimale est inférieur à l'héritage, i.e. si $u(C'_\infty)/\delta < W(\underline{G})$, il est préférable de franchir le seuil critique une fois que cet état est atteint. Mais, la stratégie consistant à suivre la politique de préservation, puis à franchir le seuil critique au dernier moment n'est pas solution puisque $\tilde{H}^0(\underline{G}, p'_\infty) < \delta \cdot W(\underline{G})$ ¹⁰. Elle est donc dominée par la stratégie de passage optimale. De plus, cette dernière existe puisque $\exists p''_T < p'_\infty$ tel que $\tilde{H}^0(\underline{G}, p''_T) = \delta \cdot W(\underline{G})$.

4.3 - Interprétations

Dans cette section, nous répondrons aux questions suivantes : Les catastrophes naturelles provoquées par notre comportement sont-elles socialement acceptables ? Si oui, dans quelles limites ? La durée de la phase précédent l'événement redouté est-elle proportionnelle aux dommages prévus ? La propension à provoquer la catastrophe augmente-t-elle quand le seuil critique devient plus contraignant ?

¹⁰ - Cette solution coïncide en fait avec celle proposée par Gottinger (1991).

4.3.1 - Acceptabilité de la catastrophe

Le théorème 4.3 prouve que, dans certaines circonstances, il peut être préférable de subir une catastrophe écologique plutôt que de supporter le coût économique de la préservation de l'environnement.

De fait, la stratégie de préservation de l'équilibre écologique nécessite une mesure plus contraignante. Le prix de la pollution doit être plus grand, la consommation et le bien-être plus faibles pendant une période plus ou moins longue. Si le dommage évité grâce à cette norme environnementale sévère ne couvre pas son coût, alors la catastrophe écologique est jugée socialement acceptable.

Evidemment, l'acceptabilité de la catastrophe dépendra de l'ampleur des dommages qui l'accompagnent. Le graphique 4.3 permet de montrer que les catastrophes majeures ont moins de chances d'être subies que les autres.

Dans le cas n°1 (iso-hamiltonien C'), il est optimal de polluer au-delà du niveau critique (puisque'on accepte la catastrophe à une date T finie). Partant de là, si l'ampleur du dommage irréversible croît suffisamment, autrement dit si le bénéfice $W(\underline{G})$ diminue au point de se retrouver, par exemple, dans le cas n°3 (iso-hamiltonien C'''), alors la préservation est préférée puisqu'il devient préférable de choisir $T = \infty$.

Ce résultat se comprend très bien et va de soi. Quelle que soit la gravité de la catastrophe, le coût de la préservation ne change pas. En conséquence, si les dommages de la catastrophe deviennent plus lourds, le rendement de la préservation coûte, et ce, éventuellement, jusqu'à couvrir la totalité de son coût.

Notre réflexion pourrait sembler cynique. Pour atténuer ce sentiment, notons que, dans le cas extrême où le monde disparaît avec la catastrophe, la stratégie de préservation est toujours choisie, même si elle génère un coût très important. En effet, si $W(\underline{G})$ est nul, quelle que soit

la valeur du seuil critique, il n'existera jamais de point de passage satisfaisant le Lemme 4.2. En extrapolant, on imagine bien que les catastrophes majeures, celles conduisant à une réduction conséquente du bien-être, seront toujours évitées.

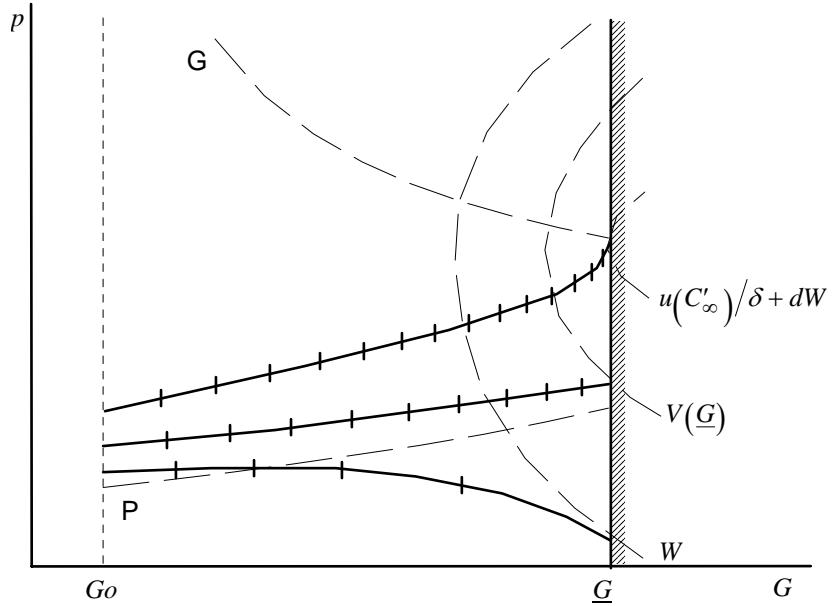
4.3.2 - Délai d'attente

Le délai d'attente optimal avant de subir la catastrophe croît avec la gravité de la catastrophe. Au-delà d'un certain niveau, il devient infini car la stratégie de préservation devient préférée. Pour démontrer cela, nous faisons varier l'ampleur de la catastrophe pour un seuil critique donné, ce qui revient à modifier la valeur de l'héritage.

Le bénéfice obtenu en demeurant infiniment au point stationnaire de la trajectoire de préservation est $u(C'_\infty)/\delta$, C'_∞ étant le niveau de consommation stationnaire de la politique de préservation optimale. Si l'héritage légué aux générations vivant après la catastrophe a une valeur inférieure à $u(C'_\infty)/\delta$, la catastrophe ne sera jamais subie : le délai est infini.

Soit $V(\underline{G})$ l'héritage maximum que l'on obtiendrait si la catastrophe n'avait aucun effet sur le bien-être. Il se détermine en suivant la trajectoire optimale du problème n°1 lorsque l'état initial est \underline{G} . Soit W une valeur plus grande encore du bénéfice. On a $u(C'_\infty)/\delta < V(\underline{G}) < W$ et, quel que soit l'héritage $W(\underline{G})$ à valeur dans l'intervalle $[u(C'_\infty)/\delta, W]$, il est toujours préférable de subir la catastrophe à une date finie.

Dans le graphique 4.5, nous représentons les trajectoires solutions du problème n°3 lorsque la fonction d'héritage prend les valeurs $u(C'_\infty)/\delta + dW$ ($dW \rightarrow 0^+$), $V(\underline{G})$ et W . A valeur illustrative uniquement, les trajectoires portent des points équidistants en termes de temps. La durée écoulée entre deux points consécutifs est la même pour toutes les trajectoires. Graphiquement, l'éloignement de deux points dépend donc de la vitesse de déplacement du système.

Graphique 4.5 : Délais optimaux avant la catastrophe

Remarque 4.2 : Le temps mis pour atteindre la catastrophe est d'autant plus long que la trajectoire est proche de l'isocline G . Ceci tient au fait que \dot{G} est d'autant plus grand que le prix implicite du polluant est petit.

La trajectoire dont le point terminal appartient à l'iso-hamiltonien $V(\underline{G})$ est confondue avec la trajectoire optimale du problème n°1 sur la portion considérée. Puisque $V(\underline{G})$ est le bénéfice maximum du problème n°1 lorsque l'état initial est le seuil critique, la proposition susdite découle directement de l'équation Hamilton-Jacobi-Bellman. Cette trajectoire nous sert ci-dessous de point de comparaison. Elle est solution des problèmes n°1 et n°3 à la fois lorsque la catastrophe est sans conséquence sur le bien-être. Nous supposons que dix périodes sont nécessaires pour atteindre le seuil critique dans ce cas (voir le graphique 4.5).

Lorsque $W(\underline{G}) \in]u(C'_\infty)/\delta, V(\underline{G})]$, le franchissement du seuil critique est optimal mais nuisible, comparé à la trajectoire de référence. Il semblerait donc naturel de chercher à retarder cet événement. Prenons, par exemple, le cas limite $W(\underline{G}) = u(C'_\infty)/\delta + dW$. La trajectoire correspondante figure sur le graphique 4.5. Comme elle est plus proche de l'isocline G que la trajectoire précédente, on en déduit qu'elle met plus longtemps à rejoindre

la pollution critique. Cette durée est le délai maximum possible pour atteindre le seuil critique (en dehors du cas où il n'est jamais atteint).

A l'opposé, lorsque $W(\bar{G}) \in [V(\underline{G}), W]$, le fait de franchir le seuil critique est non seulement optimal mais il constitue, en plus, un bienfait par rapport au cas de référence. Cette trajectoire se situe en dessous de la trajectoire de référence. Elle rejoint donc le seuil critique plus vite que la trajectoire de référence.

4.3.3 - Variation du seuil critique

Pour des valeurs suffisamment petites du seuil critique, une baisse de celui-ci rend la trajectoire de passage relativement plus intéressante. Pour des valeurs plus grandes, le même phénomène a des conséquences ambiguës sur le choix optimal.

Si \underline{G} diminue, la valeur d'héritage $W(\underline{G})$ augmente (on sait que $W'(G) = -p(T) < 0$). Toutes choses égales par ailleurs, le lemme 4.2 a donc plus de chances d'être vérifié (voir le graphique 4.3 et le raisonnement subséquent). Ce premier effet rend la trajectoire de passage optimale relativement plus intéressante. Dans le même temps, le point I' se déplace vers la gauche (voir le graphique 4.3), si bien que le Hamiltonien maximisé calculé au point I' augmente (il est situé sur un iso-hamiltonien à gauche de l'ancien). Le lemme 4.2 a donc moins de chances d'être vérifié. Ce second effet accroît l'attrait de la trajectoire de préservation optimale. Il n'est donc pas possible de conclure.

L'ambiguïté de ce résultat disparaît lorsque l'on considère les iso-hamiltoniens situés à gauche du point d'intersection des isoclines $\tilde{H}_p = 0$ et $\tilde{H}_G = 0$ du graphique 4.3. Dans ce cas, le second effet joue dans le même sens que le premier puisque le Hamiltonien maximisé calculé au point I' diminue lorsque le point I' se déplace vers la gauche. La trajectoire de passage devient donc encore plus intéressante.

Sans risque d'erreur, on peut dire que toute diminution du seuil critique rend plus contraignant l'objectif de préservation environnementale. Pratiquement, il faut augmenter le prix initial de la pollution pour y parvenir. Ceci a pour effet d'accroître le coût d'opportunité de cette mesure (ceci est d'autant plus vrai que le seuil critique est déjà petit). Graphiquement, ceci se traduit par un déplacement de la trajectoire de préservation vers le haut. Il s'ensuit que, plus la catastrophe est imminente, plus la stratégie de passage est attractive.

4.4 - Fonction d'héritage

Jusqu'ici, nous nous sommes concentrés exclusivement sur la période précédant la catastrophe écologique. Pour être plus général, nous ne posons aucune hypothèse particulière la concernant, en nous contentant d'affirmer que l'ensemble des informations utiles était contenu dans la valeur d'héritage. Il nous reste maintenant à montrer comment se détermine cette valeur.

4.4.1 - Le bien-être après la catastrophe

A la date où la catastrophe se produit, l'Humanité hérite d'un système écologique qu'elle va exploiter au mieux pour améliorer son propre bien-être. Le programme intertemporel ainsi défini débute à l'instant T , avec un stock de pollution \underline{G} . Il détermine la fonction d'héritage $W(\underline{G}, T)$.

Si le problème est autonome, on pourra toujours prouver que $W(\underline{G}, T) = e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G})$ (voir la relation (1.9)). Cette propriété pose simplement que la valeur courante du bénéfice après la catastrophe dépend uniquement du seuil critique, pas de la date à laquelle il est rejoint. Cette propriété est très intuitive. Cela étant dit, il devient facile de déterminer la valeur optimale de l'héritage $W(\underline{G})$ et de retrouver une formulation identique au problème n°3.

Exemple 4.1 : Supposons que la catastrophe provoque une perte de bien-être constante, égale à x , jusqu'à la fin des temps. On détermine l'héritage en résolvant le programme suivant :

$$W(\underline{G}) = \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot [u(C(t)) - x] dt$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t),$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)),$$

$$G(0) = \underline{G},$$

$$g(t) \geq 0, \forall t.$$

Puisque le dommage imputable à la catastrophe est identique quelle que soit la trajectoire empruntée, la solution optimale de ce problème est confondue avec celle du problème n°1 sur l'intervalle considéré.

$$\underline{\text{Preuve}} : \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot [u(C(t)) - x] dt \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt - \frac{x}{\delta} \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt.$$

4.4.2 - A l'instant de passage...

Nous nous intéressons, dans ce paragraphe, aux modifications que subit la politique optimale à l'instant du franchissement du seuil critique. Avant la catastrophe, nous savons qu'il est souhaitable de taxer fortement les émissions en vue de retarder son apparition. Par contre, une fois qu'elle est subie, cette motivation disparaît et il devient inutile de taxer les émissions à ce point (en tout cas, on peut le penser). Il est donc probable que la taxe optimale avant la catastrophe soit plus élevée que son équivalent après cette dernière. C'est ce que nous allons démontrer dans cette section, en utilisant l'exemple 4.1.

Lemme 4.3 : La condition de passage (4.6a) du lemme 4.2 est satisfaite lorsque les Hamiltoniens maximisés juste avant et juste après l'événement sont égaux.

Preuve : L'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman implique que le hamiltonien maximisé du nouveau programme d'optimisation débutant après la catastrophe vérifie la propriété suivante : $\tilde{H}^0(\underline{G}, p(T)) = \delta \cdot W(\underline{G})$. La comparaison des Hamiltoniens supplée donc l'utilisation de la condition (4.6a).

Utilisons le lemme 4.3 pour le cas où la catastrophe réduit les flux de bien-être d'un montant x constant. $\tilde{H}^0(G, p) = u(f(g(G, p), G)) - p \cdot \dot{G}$ et $\tilde{H}^0(G, p) = u(f(g(G, p), G)) - x - p \cdot \dot{G}$ sont les expressions des Hamiltoniens maximisés avant et après la catastrophe respectivement ($g(G, p)$ est la demande d'émission : voir la relation (1.6)). Dès lors, si le prix immédiatement avant la catastrophe et le prix immédiatement après la catastrophe sont égaux, la condition (4.6a) ne sera jamais remplie.

Preuve : Si $p(T) = p(T^-) = p$, on a : $\tilde{H}^0(\underline{G}, p(T)) - \tilde{H}^0(\underline{G}, p(T^-)) = -x < 0$. On démontre que le lemme 4.3 est vérifié si et seulement si $p(T^-) > p(T)$ lorsque $x > 0$.

La date T est donc un point de jonction et la variable adjointe est discontinue en ce point. La possibilité d'une telle discontinuité avait été envisagée dans la proposition 4.1.

4.5 - Application numérique

L'objectif de l'application numérique présente est de prouver la supériorité de la trajectoire de passage optimale (voir la sous-section 4.2.3) sur la proposition de Gottinger (1991). La spécification utilisée a déjà été employée dans la section 1.3 du chapitre 1. Le paramétrage des fonctions ne change pas, en dehors de la valeur de la constante a . Celle-ci est supposée nulle tant qu'un seuil critique de pollution, fixé à $\underline{G} = 20$, n'a pas été dépassé. Ce scénario traduit donc le cas de figure d'une économie qui ne subirait aucun dommage climatique avant \underline{G} . Le niveau de pollution initial est fixé à $G_0 = 10$.

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, les fonctions du modèle s'écrivent :

$$f(g, G) = g^\rho, \quad (4.7)$$

$$u(C) = \frac{1}{1-\sigma} \cdot C^{1-\sigma}. \quad (4.8)$$

L'équilibre stationnaire de la politique de préservation optimale se caractérise par un stock de pollution égal au seuil critique et une émission juste suffisante pour maintenir celui-ci à cette valeur : $G'_\infty = \underline{G}$ et $g'_\infty = \beta \cdot \underline{G}$. Le bien-être intertemporel associé au fait de rester indéfiniment en ce point est $u(C'_\infty)/\delta = (\beta \cdot \underline{G})^{1-\sigma} / [(1-\sigma) \cdot \delta]$.

Pour s'assurer que la politique de passage soit préférable à la politique de préservation, l'héritage, i.e. le bien-être qui est obtenu à l'instant du franchissement du seuil critique, est supposé égal à $W = 1,01 \cdot u(C'_\infty)/\delta$.

Les conditions d'optimalité (4.3) et (4.4) et la condition de transversalité (4.6a) s'écrivent :

$$\rho \cdot g^{\rho(1-\sigma)-1} = p, \quad (4.9)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p - \lambda, \quad (4.10)$$

avec $\lambda \geq 0$, $\underline{G} - G \geq 0$ et $\lambda \cdot (\underline{G} - G) = 0$,

$$\frac{g(T)^{\rho(1-\sigma)}}{1-\sigma} - p(T) \cdot (g(T) - \beta \cdot \underline{G}) = \delta \cdot W. \quad (4.11)$$

La fonction de demande d'émission se déduit de la relation (4.9) :

$$g(p) = \left(\frac{p}{\rho} \right)^X, \quad (4.12)$$

$$\text{où } X = (\rho \cdot (1 - \sigma) - 1)^{-1}.$$

Tant que $G(t) < \underline{G}$, la trajectoire du prix implicite de la pollution se détermine aisément en résolvant l'équation différentielle (4.10). Les autres trajectoires, celles de l'émission et du

stock de gaz à effet de serre se déduisent sans difficulté de la première. On écrit donc les relations suivantes :

$$p(t) = p_0 \cdot e^{(\delta+\beta)t}, \quad (4.13)$$

$$g(t) = \left(\frac{p_0}{\rho} \right)^X \cdot e^{X(\delta+\beta)t}, \quad (4.14)$$

$$G(t) = e^{-\beta t} \cdot \left[G_0 + \left(\frac{p_0}{\rho} \right)^X \cdot \frac{e^{(\beta+X)(\delta+\beta)t} - 1}{\beta + X(\delta+\beta)} \right]. \quad (4.15)$$

Nous recherchons maintenant p_0 et T tels que $G(T) = \underline{G}$ et tels que la condition de transversalité (4.11) soit satisfaite. En utilisant le module de résolution de systèmes d'équations non linéaires de MathCad 6.0, nous avons déterminé que les valeurs $p_0'' = 0,04$ et $T'' = 11,104$ vérifiaient ces conditions. Elles définissent la trajectoire de passage optimale.

Pour déterminer la trajectoire de préservation optimale, il faut trouver p_0 et θ tels que $G(\theta) = \underline{G}$ et tel que $g(\theta) = \beta \cdot \underline{G}$. Les valeurs solutions $p_0' = 0,064$ et $\theta = 39,59$ sont obtenues par la même méthode que précédemment.

Notons $V(G_0, T, w)$ le bien-être intertemporel obtenu lorsque l'économie met T unités de temps pour rejoindre le seuil critique \underline{G} et lorsque le bien-être associé à cette trajectoire est augmenté de $e^{-\delta T} \cdot w$. A partir des relations précédentes, on démontre que :

$$V(G_0, T, w) = \frac{1}{1-\sigma} \cdot \left(\frac{p_0}{\rho} \right)^{\rho(1-\sigma)X} \cdot \frac{e^{(\rho(1-\sigma)(\delta+\beta)X-\delta)T} - 1}{\rho(1-\sigma)(\delta+\beta)X - \delta} + e^{-\delta T} \cdot w. \quad (4.16)$$

$V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta)$ mesure alors le bien-être intertemporel associé à la politique de préservation optimale et $V(G_0, T'', W)$ l'équivalent pour la politique de passage optimale. La solution envisagée par Gottinger, réinterprétée dans le cadre du problème n°3, consisterait à suivre la politique de préservation optimale jusqu'à atteindre \underline{G} puis à accepter ensuite la

catastrophe à condition que $W > u(C'_\infty)/\delta$, ce qui est le cas par hypothèse. Le bien-être correspondant est donc égal à $V(G_0, \theta, W)$. On obtient les résultats suivants :

- Stratégie de préservation : $V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta) = 131,712$;
- Stratégie de passage selon Gottinger : $V(G_0, \theta, W) = 131824$;
- Stratégie de passage : $V(G_0, T'', W) = 132,167$.

L’application numérique confirme, d’une part, que l’évitement d’une catastrophe écologique n’est pas nécessairement préférable et, d’autre part, que la trajectoire de passage optimale, mise en évidence dans ce chapitre, est supérieure à la solution qui était proposée par Gottinger.

4.6 - Conclusion

L’analyse des catastrophes climatiques irréversibles conduit à définir deux stratégies d’action. L’une consiste à parer la catastrophe en imposant une norme environnementale, définie par un niveau de pollution maximale ; nous l’avons baptisée “stratégie de préservation”. L’autre consiste seulement à retarder la catastrophe ; nous l’appelons “stratégie de passage”. Nos résultats établissent que :

- la préservation est préférable dans le cas de catastrophes majeures. Par contre, pour des dommages ponctuels d’amplitude plus réduite, le dommage évité ne couvre pas le coût de la norme de pollution maximale requise pour prévenir la catastrophe, si bien que cette mesure n’est pas justifiée ;
- lorsqu’elle est préférée, la stratégie de passage s’écarte de la trajectoire qui serait suivie en l’absence de catastrophe, de manière à retarder l’instant où la catastrophe sera subie. L’avantage procuré par ce délai provient du mécanisme d’actualisation.

Replacé dans un contexte plus général, les résultats obtenus ici ont plusieurs conséquences importantes. En premier lieu, la prise en compte des dommages catastrophiques modifie considérablement la forme de la politique optimale de lutte contre l’effet de serre. Dans le cas

d'un dommage majeur, elle s'exprime sous la forme d'une norme environnementale, si bien que le prix implicite de l'émission agrège deux composantes : la première exprime la valeur présente des dommages marginaux futurs et l'autre provient de la contrainte environnementale fixée. Ainsi, si les climatologues établissent avec plus de certitude le bien-fondé de certaines des hypothèses catastrophiques, comme par exemple la déviation du Gulf Stream, la politique de l'effet de serre prendra une toute autre tournure. Si les dégâts encourus s'avéraient importants, il faudrait envisager de limiter les émissions de gaz à effet de serre suffisamment pour se mettre à l'abri. La taxe optimale sur les émissions pourrait alors être élevée.

En second lieu, ces résultats remettent cruellement en question la compatibilité entre le critère utilitariste et le concept de développement soutenable. Si l'on accepte la définition du rapport Brundtland (WCED, 1987), celle d'un développement qui garantit la satisfaction des besoins présents sans hypothéquer la faculté des générations futures à satisfaire les leurs, il semble que la stratégie de passage rentre en conflit avec les principes de soutenabilité. En effet, elle conduit à la destruction d'une composante du patrimoine naturel, sans possibilité d'un retour à la situation initiale. Ceci serait évidemment jugé inacceptable par les générations futures. Dans ces conditions, un recours plus systématique à la stratégie de préservation n'est-il pas indiqué ?

Annexe 4.1 : Démonstration des conditions transversales

Les conditions de transversalité des lemmes 4.1 et 4.2 découlent des théorèmes 10.3.2 (et son corollaire) et 7.6.1 de Léonard & Long (1992) respectivement. Néanmoins, la preuve développée dans cette annexe, bien qu'elle ne soit pas générale car elle suppose que la fonction de bien-être intertemporel est dérivable, a l'avantage de les présenter de façon pédagogique.

Soit la fonction de valeur optimale définie pour une valeur donnée de T :

$$V(G_0, T) = \max_{g(t)} \int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt.$$

Dans le problème n°3, nous cherchons à maximiser $V(G_0, T) + e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G})$, sous les contraintes $\underline{G} - G(T) \geq 0$ et $T \geq 0$. Posons donc le lagrangien associé à ce programme :

$$\mathcal{L} = V(G_0, T) + e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G}) + \lambda_1 \cdot (\underline{G} - G(T)) + \lambda_2 \cdot T.$$

En supposant que $V(G_0, T)$ est dérivable par T et $G(T)$, les conditions du premier ordre sont les suivantes :

$$\mathcal{L}_T = V_T(G_0, T) - \delta \cdot e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G}) - \lambda_1 \cdot \dot{G}(T) + \lambda_2 \geq 0 \text{ (égalité pour une solution finie),}$$

$$\mathcal{L}_{G(T)} = V_{G(T)}(G_0, T) - \lambda_1 = 0,$$

avec

$$\lambda_1 \geq 0, \underline{G} - G(T) \geq 0 \text{ et } \lambda_1 \cdot (\underline{G} - G(T)) = 0,$$

$$\lambda_2 \geq 0, T \geq 0 \text{ et } \lambda_2 \cdot T = 0.$$

Or, dans l'appendice 2, nous montrons, pour le cas général, que :

$$V_T(G_0, T) = e^{-\delta T} \cdot \tilde{\mathcal{H}}^0(G(T), p(T)),$$

$$V_{G(T)}(G_0, T) = e^{-\delta T} \cdot p(T).$$

On peut dresser le tableau des conditions de transversalité suivant :

Solution pour G Solution pour T	$\underline{G} - G(T) > 0$ ($\lambda_1 = 0$)	$\underline{G} - G(T) = 0$ ($\lambda_1 \geq 0$)
T fini ($\lambda_2 = 0$)	Aucun sens dans notre modèle	$\tilde{H}^0(G, p) = \delta \cdot W(G)$ $p(T) \geq 0$
$T = \infty$ ($\lambda_2 = 0$).	$\tilde{H}^0(G, p) > \delta \cdot W(G)$ $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p(t) = 0$	$\tilde{H}^0(G, p) > \delta \cdot W(G)$ $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p(t) \geq 0$

Les cases encadrés en gras sont celles qui nous intéressent pour retrouver les conditions de transversalité des lemmes 4.1 et 4.2.

Annexe 4.2 : Carte des iso-profits

Nous cherchons à tracer dans le plan (G, p) le lieu des points où $\tilde{H}^0(G, p) = C$. Le long d'une de ces courbes, on a :

$$d\tilde{H}^0(G, p) = \tilde{H}_G^0(G, p) \cdot dG + \tilde{H}_p^0(G, p) \cdot dp = 0,$$

$$\text{avec } \tilde{H}_G^0(G, p) = \dot{p} - \delta p \text{ et } \tilde{H}_p^0(G, p) = -\dot{G}.$$

On a donc :

$$\frac{dp}{dG} \left/ \tilde{H}^0(G, p) = C \right. = -\frac{\tilde{H}_G^0(G, p)}{\tilde{H}_p^0(G, p)} = \frac{\dot{p} - \delta \cdot p}{-\dot{G}}.$$

Nous pouvons utiliser les isoclines du plan des phases pour déduire la pente de la courbe représentant le lieu des points où le hamiltonien maximisé est constant.

Nous connaissons déjà le lieu des points où $\tilde{H}_p^0(G, p) = -\dot{G} = 0$. Tout point au-dessus de cette isocline est tel que $\tilde{H}_p^0(G, p) > 0$, et réciproquement.

Nous avons déjà mis en évidence l'isocline $\dot{p} = 0$. Lorsque $\dot{p} = 0$, on a $\tilde{H}_G^0(G, p) = -\delta \cdot p < 0$.

Nous montrons de plus que la dérivée du hamiltonien par rapport à la variable d'état est une fonction croissante de la variable adjointe :

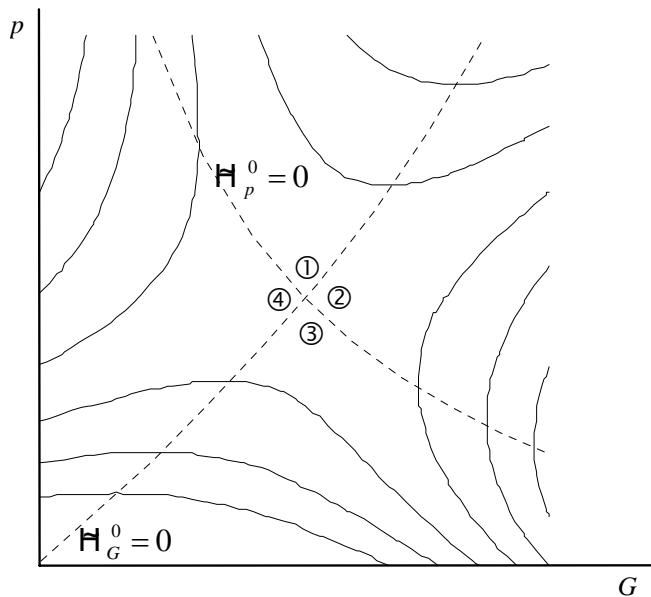
$$\tilde{H}_{Gp}^0(G, p) = \beta + (f_{gG} \cdot u' + f_G \cdot f_g \cdot u'') \cdot g_p \geq 0.$$

Pour G donné, il faut choisir une valeur de la variable adjointe supérieure à celle qui produit le résultat $\dot{p} = 0$ pour avoir $\tilde{H}_G^0(G, p) = 0$. L'isocline $\tilde{H}_G^0(G, p) = 0$ se situe donc au-dessus de l'isocline P . De plus, tout point du plan au-dessus de cette nouvelle isocline sera tel que

$$\tilde{H}_G^0(G, p) > 0, \text{ et réciproquement. Sachant que } \frac{dp}{dG} \Big|_{\tilde{H}_G^0 = 0} = -\frac{\tilde{H}_{gg} \cdot \tilde{H}_{GG} - (\tilde{H}_{gG})^2}{\beta \cdot \tilde{H}_{gg} + \tilde{H}_{gG}} \geq 0, \text{ le lieu des}$$

points où $\tilde{H}_G^0(G, p) = 0$ est non décroissant.

Nous pouvons maintenant représenter la carte des “iso-hamiltoniens” :



Compte tenu des résultats obtenus, on peut affirmer que la pente de la courbe représentant $\tilde{H}^0(G, p) = C$ est positive dans les cadrants ② et ④, négative dans les cadrants ① et ③.

Chapitre 5

Incertitudes

L'incertitude intervient à toutes les étapes de l'élaboration d'une politique du climat. Ce fait n'est plus à démontrer et apparaît avec trop de clarté dans le chapitre préliminaire sur le phénomène de l'effet de serre et dans le chapitre 3 consacré à l'évaluation des dommages climatiques.

L'étape de la prévision des changements climatiques introduit la première marge d'erreur. En premier lieu, la relation entre la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre et l'accroissement de la température n'est pas fiable. Du fait d'un grand nombre de rétroactions plus ou moins bien anticipées, les modèles de circulation générale prédisent, pour le doublement de la concentration en dioxyde de carbone, que la température augmenterait d'une valeur allant de 1,5 à 4,5 degrés Celsius, l'estimation médiane étant 2,5 degrés Celsius. En second lieu, l'étape suivante, consistant à donner une signification géographique précise à cette donnée moyenne, est mal gérée par les modèles de circulation générale. Les prévisions de l'accroissement des températures et de l'évolution pluviométrique en différents points du globe sont encadrées par des intervalles importants.

La marge d'erreur est accrue par l'étude des conséquences écologiques des changements climatiques. Même s'ils disposaient de cartes climatiques précises pour décrire les bouleversements à venir, les biologistes auraient beaucoup de difficultés à fournir des prévisions fiables car, d'une part, les facultés d'adaptation des écosystèmes dépendent d'un grand nombre de paramètres et, d'autre part, les équilibres écologiques sont souvent instables, si bien qu'un écart faible des conditions climatiques peut engendrer des modifications très grandes.

A cela, l'évaluation économique des dommages ajoute son lot d'approximations. Même dans les meilleures conditions, les méthodes employées ne sont pas dénuées d'imperfection et sont

sources d'erreurs : prix hédonistes, évaluation contingente et valeurs d'existence... Les difficultés sont amplifiées par le fait que ces conditions sont loin d'être remplies. L'évaluation économique des dommages climatiques exige de s'intéresser à l'incidence future de la pollution et, donc, de formuler, implicitement ou explicitement, des hypothèses sur l'évolution des préférences et des technologies. A l'évidence, ceci n'est pas possible sans introduire à nouveau de nombreuses imperfections.

Bien que la liste puisse sembler déjà longue, l'essentiel du problème de l'incertitude est peut-être ailleurs. Nous faisons ici allusion aux effets secondaires catastrophiques, conjecturés par certains experts (climatologues et biologistes) mais qui, à ce jour, ne sont pas modélisés ou modélisables. La communauté scientifique anticipe de tels risques mais reste incapable d'en déterminer l'ampleur et les conditions d'apparitions.

La littérature économique consacrée à l'influence de tels risques sur la pollution optimale est très limitée. Pethig (1991b) se penche sur les problèmes posés par une catastrophe dont la gravité serait incertaine. Dans ces circonstances, le bien-être associé à la stratégie de passage devient aléatoire, tandis que le bien-être attaché à la préservation de l'environnement reste certain. Faute de mieux, le planificateur décide la politique à suivre en comparant ces deux informations. Ce faisant, il s'expose à de mauvaises surprises si l'issue de la catastrophe est très éloignée de ses prévisions.

Ce scénario est quelque peu simpliste. En réalité, selon toute évidence, la connaissance des risques de catastrophe s'améliore avec le temps, grâce à des avancées scientifiques dans la compréhension et la modélisation du climat. Le planificateur, s'il est conscient de cette tendance, cherchera à exploiter ces opportunités d'apprentissage futures, dans l'idée de réduire le risque de prendre la mauvaise décision. Pour étudier cela, nous supposerons, dans une première section, que le planificateur devient pleinement informé de la gravité de la catastrophe après un délai donné (les progrès scientifiques sont donc exogènes). Nous définirons une stratégie de précaution, consistant à attendre les nouvelles informations avant d'engager toute action irréversible. Nous la comparerons avec les deux attitudes définies dans le chapitre 4. Deux résultats ressortiront de cette discussion. Premièrement, le bien-être de la

stratégie de précaution est supérieur à celui de la préservation ; l'écart entre les deux définit une valeur de quasi-option (Arrow et Fisher, 1974 ; Henry, 1974 ; Fisher & Hanemann, 1987), représentant la valeur attendue de l'information à venir. Le second résultat découle directement du premier : ne pas tenir compte des progrès scientifiques, autrement dit persister à choisir sa politique en comparant les gains de la préservation à ceux de la stratégie de passage, n'est pas rationnel et introduit un biais systématique en faveur de la politique de passage.

D'autres travaux ont porté sur la recherche de la réaction optimale devant une catastrophe écologique dont l'échéance serait incertaine (Clarke & Reed, 1994 ; Gottinger, 1991 ; Roe & alli, 1994). Dans ce cas, c'est le seuil critique qui devient aléatoire. Sur ce sujet, nous nous contenterons de proposer une synthèse rapide des résultats les plus importants et de la méthode utilisée.

5.1 - Incertitude sur la gravité de la catastrophe et progrès scientifiques

Imaginons que la valeur de l'héritage $W(\underline{G})$ du problème n°3 soit une variable aléatoire dont la distribution de probabilité est connue. Soit $h(W)$ la densité de probabilité de l'héritage, avec $W(\underline{G}) \in [W_{\min}, W_{\max}]$. Un tel scénario s'applique dans le cas d'une catastrophe écologique dont l'échéance est prévue mais dont la gravité est mal connue.

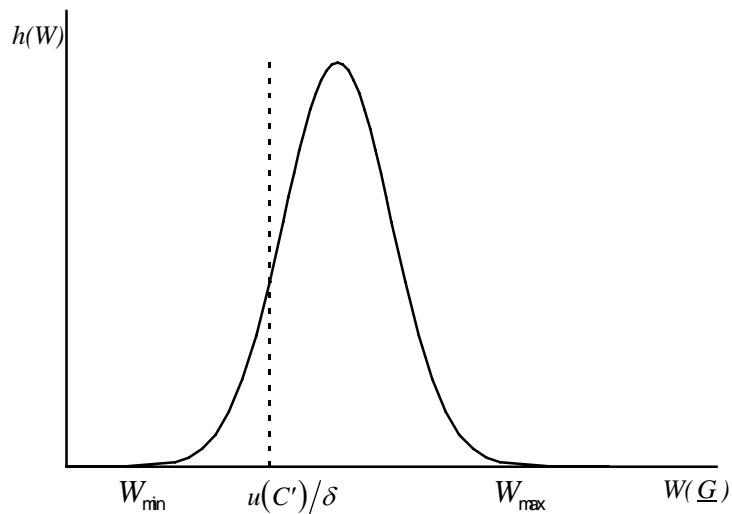
5.1.1 - Aucun progrès scientifique

Confronté à la menace d'une catastrophe incertaine, il semble raisonnable que le planificateur utilise l'espérance mathématique de la valeur d'héritage pour déterminer la politique à suivre. S'il se comporte effectivement de cette manière, l'incertitude sur la gravité de la catastrophe ne modifie le problème n°3 qu'en apparence et le théorème 4.3 s'applique. Il implique que le choix optimal consiste à provoquer la catastrophe si l'état stationnaire de la

politique de préservation optimale produit un bien-être intertemporel inférieur à l'héritage attendu, i.e. si $u(C'_\infty)/\delta < E[W(\underline{G})]$ (voir le chapitre 4).

Ce cas de figure est précisément celui que nous avons retenu pour construire le graphique 5.1. Si cette configuration se présente, le gain certain $u(C'_\infty)/\delta$ est plus petit que l'espérance mathématique de l'héritage. Le planificateur, s'il s'appuie sur cette dernière donnée pour conduire sa politique, optera pour la trajectoire de passage optimale. Evidemment, rétrospectivement, cette décision risque d'être regrettée si la catastrophe est plus grave que prévu, autrement dit si l'héritage correspondant est plus petit que $u(C'_\infty)/\delta$.

Graphique 5.1 : Distribution de probabilité de l'héritage



Pour la suite, nous restreindrons l'analyse au cas de figure imaginé à l'instant, les autres ne nous intéressent pas. Nous posons donc l'hypothèse :

$$u(C'_\infty)/\delta < E[W(\underline{G})]. \quad (H1)$$

L'autre hypothèse importante sera que le gain certain de l'état stationnaire de la stratégie de préservation est supérieur strictement au gain de la pire éventualité concernant la catastrophe :

$$W_{\min} < u(C'_\infty)/\delta. \quad (H2)$$

Cette seconde restriction s'impose puisque, dans le cas contraire, il n'y aurait aucune raison de douter du bien-fondé de la politique de passage optimale. L'incertitude n'aurait alors aucune conséquence sur la prise de décision.

5.1.2 - Progrès scientifiques dans la prévision de la catastrophe

Même si, en utilisant le calcul de l'espérance de l'héritage, le planificateur parvient à décider de la trajectoire à suivre, il ne fait aucun doute qu'il préférerait obtenir d'autres informations avant de prendre la décision irréversible de provoquer la catastrophe. Pour cela, il pourrait même trouver justifié de financer des programmes de recherche pour favoriser les progrès de la connaissance scientifique du climat.

Pour prendre en considération ce souhait, nous supposons, en nous inspirant de Pethig (1991b), qu'une évaluation certaine de l'incidence de la catastrophe devient disponible à une date τ donnée. A cet instant, la valeur de $W(\underline{G})$ devient donc connue avec certitude. Nous supposons, de plus, que la date τ est postérieure au moment T'' qu'aurait normalement choisi le décideur pour provoquer la catastrophe :

$$\tau > T''. \text{ (H3)}$$

Compte tenu de l'hypothèse (H3), si le décideur souhaite utiliser les nouvelles informations pour conduire sa politique, il doit renoncer à son choix initial (qui est de passer le seuil critique à l'instant T'' , par hypothèse) et différer la décision de provoquer la catastrophe jusqu'en τ .

Cette stratégie renvoie, à notre avis, au principe de précaution, utilisé de plus en plus fréquemment dans le droit international de l'environnement. Kiss (1993, p.72) nous dit qu'il s'applique « dans des cas où des dommages ou une irréversibilité graves sont à craindre. ». La Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992) précise ce concept en affirmant que, « quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de ... mesures » (Article 3, alinéa 3). Dans les discussions à venir, nous définirons la stratégie de précaution comme une politique consistant à attendre les nouvelles données scientifiques avant de

prendre toute mesure irréversible. La rationalité de cette stratégie sera prouvée en montrant que le bien-être intertemporel attendu résultant est supérieur, dans certains cas, à celui de la politique de passage optimale.

La stratégie de précaution consiste donc à fixer une norme de pollution maximale, égale au seuil critique de concentration, jusqu'à la date τ . Le programme du planificateur se pose alors sous la forme d'un problème de contrôle optimal avec horizon temporel fini (la date τ) et contrainte sur la variable d'état (la condition (5.1e)) :

Problème n°4 :

$$\max_{g(t)} \int_0^\tau e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt \quad (5.1)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t), \quad (5.1a)$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)), \quad (5.1b)$$

$$G(0) = G_0, \quad (5.1c)$$

$$g(t) \geq 0, \quad \forall t, \quad (5.1d)$$

$$G(t) \leq \underline{G}, \quad \forall t \in [0, \tau], \quad (5.1e)$$

$$G(\tau) = \underline{G}. \quad (5.1f)$$

Les fonctions gardent les mêmes propriétés que dans le problème n°1.

5.1.2.1 - Résolution ¹

La méthode de résolution est désormais habituelle. On forme le Hamiltonien généralisé :

¹ - Voir l'appendice 1.

$$\tilde{H}(G, g, p) = u(f(g, G)) - p(g - \beta \cdot G) + \lambda \cdot (\underline{G} - G). \quad (5.2)$$

Soit $\langle G'''(t), g'''(t) \rangle$ la solution du problème posé. Alors, il existe $p(t)$ continue et dérivable par morceaux et la solution optimale respecte les conditions suivantes :

$$f_g(g''', G''').u'(f(g''', G''')) = p, \quad (5.3)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + f_G(g''', G''') \cdot u'(f(g''', G''')) - \lambda, \quad (5.4)$$

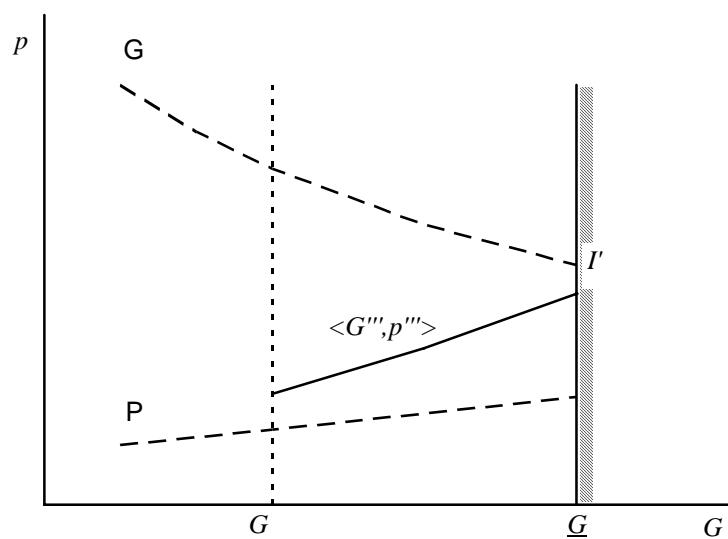
avec $\lambda \geq 0$, $\underline{G} - G \geq 0$ et $\lambda.(\underline{G} - G) = 0$.

La solution optimale vérifie en outre la contrainte finale (5.1f). Cette contrainte se substitue aux conditions de transversalité habituelles.

5.1.2.2 - La stratégie de précaution

Pour $G < \underline{G}$, la contrainte (5.1a) et les conditions (5.3) et (5.4) sont identiques à celles du problème n°1. Les isoclines P et G , i.e. le lieu des points où $\dot{p} = 0$ et $\dot{G} = 0$ respectivement, vérifient le lemme 1.2. Le diagramme des phases associé à ce problème est donc identique à celui que l'on utilisait dans le chapitre 1, tant que la variable d'état reste inférieure au seuil critique.

Graphique 5.2 : Trajectoire de précaution



La trajectoire $\langle G''', p''' \rangle$, représentée dans le graphique 5.2, décrit la politique de précaution. Elle conduit l'économie de l'état initial G_0 à l'état terminal \underline{G} en τ unités de temps. Plus le délai d'attente avant d'obtenir les informations complémentaires est grand, plus la trajectoire correspondante est élevée dans le diagramme des phases. Dans le cas où $\tau \geq \theta$, θ étant la date à laquelle la trajectoire de préservation atteint \underline{G} , la politique de précaution est confondue avec cette dernière jusqu'en τ . Elle rejoint l'état stationnaire I' de la politique de préservation et y reste pendant l'intervalle $[\theta, \tau]$ (voir le chapitre 4).

5.1.2.3 - Rationalité de la norme de précaution

Nous nous interrogeons maintenant sur les raisons qui poussent à choisir la stratégie de précaution plutôt que la stratégie de passage optimale. En apparence, compte tenu des hypothèses retenues, la politique de passage est préférable : elle maximise l'espérance mathématique du bien-être intertemporel et la perspective d'une découverte future ne change rien à ce résultat. A priori, la stratégie de précaution serait donc irrationnelle. En fait, nous allons voir que la décision d'attendre les progrès scientifiques accroît l'espérance mathématique des gains par élimination des issues les plus défavorables de la catastrophe. Ceci pourrait justifier, dans certains cas, de préférer la stratégie de précaution.

Si le planificateur choisit d'emprunter la trajectoire de précaution, il acquiert la possibilité de choisir avec certitude entre la préservation et la catastrophe dans le futur. A l'instant τ , l'événement redouté est imminent puisque $G(\tau) = \underline{G}$. Il faut alors arbitrer entre la politique de préservation optimale et la politique de passage optimale. Le critère rationnel pour prendre cette décision est de comparer $u(C'_\infty)/\delta$ et l'héritage $W(\underline{G})$, qui est maintenant connu avec certitude. Si la première valeur est plus grande que la seconde, l'action consistant à rejoindre instantanément l'état stationnaire I' et à s'y maintenir indéfiniment pour préserver l'environnement est préférable. Sinon, l'action de provoquer la catastrophe pour “toucher” l'héritage $W(\underline{G})$ doit être choisie. A l'instant τ , le bénéfice obtenu est donc égal à $\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\}$ (en valeur courante).

Vu de l'instant initial, puisqu'il ignore la valeur de $W(\underline{G})$ qui se réalisera effectivement, le décideur doit se contenter d'évaluer l'espérance mathématique de $\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\}$. Sachant la densité de probabilité de l'héritage, elle est égale à :

$$E \left[\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\} \right] = \frac{u(C'_\infty)}{\delta} \cdot \int_{W_{\min}}^{u(C'_\infty)/\delta} h(w) dw + \int_{u(C'_\infty)/\delta}^{W_{\max}} w \cdot h(w) dw. \quad (5.5)$$

L'avantage procuré par la stratégie de précaution apparaît clairement dans la relation (5.5). Cette politique “soulage la conscience” du planificateur en lui offrant la possibilité d'éliminer les réalisations les plus défavorables de la catastrophe, i.e. toutes celles telles que $W(\underline{G}) < u(C'_\infty)/\delta$. Mathématiquement, comme, par hypothèse, certaines réalisations possibles de la catastrophe produisent un bien-être inférieur au bénéfice certain $u(C'_\infty)/\delta$, l'espérance mathématique du gain de la décision certaine à l'instant τ est strictement supérieure à l'espérance mathématique de l'héritage.

Théorème 5.1 : Si l'hypothèse (H2) est satisfaite, alors $E \left[\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\} \right] > E[W(\underline{G})]$.

La suite de nos discussions va donc consister à démontrer que cet avantage peut justifier le choix de la stratégie de précaution. Adoptons les notations suivantes :

$$\begin{aligned} W_1 &= E[W(\underline{G})], \\ W_2 &= E \left[\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\} \right], \\ V(G_0, T, W) &= \max_{g(t)} \int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt + e^{-\delta T} \cdot W. \end{aligned}$$

La fonction $V(G_0, T, W)$ mesure l'espérance mathématique du bien-être intertemporel obtenu lorsque G_0 est l'état initial du système, lorsque T désigne la date à laquelle l'héritage est reçu et lorsque W mesure la valeur attendue de l'héritage. Compte tenu de ces conventions, $V(G_0, T'', W_1)$ mesure le bien-être intertemporel correspondant à la politique de passage

optimale, $V(G_0, \tau, W_2)$ le bien-être associé à la stratégie de précaution et $V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta)$ le bien-être de la préservation.

Le cas particulier où l'on est à la veille de la catastrophe dès l'instant initial, c'est-à-dire quand $G_0 = \underline{G}$, est riche d'enseignement. Dans cette hypothèse, le choix de provoquer la catastrophe se pose dès l'origine et assure un gain $V(\underline{G}, 0, W_1) = W_1$. La stratégie de précaution concurrente consiste, quant à elle, à limiter l'émission de gaz à effet de serre au niveau $\beta \cdot \underline{G}$ pour éviter la catastrophe jusqu'à l'instant τ . Graphiquement, le système reste au point stationnaire I' pendant τ unités de temps (voir le graphique 5.2). Le bien-être obtenu est alors égal à $V(\underline{G}, \tau, W_2) = (1 - e^{-\delta \tau}) \cdot u(C'_\infty)/\delta + e^{-\delta \tau} \cdot W_2$.

Si les progrès scientifiques dans la connaissance des effets de la catastrophe sont immédiats, i.e. si $\tau = 0$, la stratégie de précaution sera toujours choisie si (H2) est vérifiée. En effet, en vertu du théorème 5.1, on a alors $V(\underline{G}, 0, W_2) = W_2 > V(\underline{G}, 0, W_1) = W_1$. Dans le cas où les progrès scientifiques n'arrivent jamais, i.e. quand $\tau = \infty$, la décision de provoquer la catastrophe est évidemment confirmée car $V(\underline{G}, \infty, W_2) = u(C'_\infty)/\delta < V(\underline{G}, 0, W_1) = W_1$ du fait de (H1). Pour des dates intermédiaires, soit lorsque $0 < \tau < \infty$, on démontre qu'il existe un délai limite $\bar{\tau}$ tel que la stratégie de précaution est toujours choisie si $\tau < \bar{\tau}$, et inversement.

Preuve :

On commence par prouver que le gain de la stratégie de précaution est une fonction monotone décroissante de τ en trouvant que $\partial V(\underline{G}, \tau, W_2) / \partial \tau = \delta \cdot e^{-\delta \tau} \cdot \{u(C'_\infty)/\delta - W_2\} < 0$ si (H1) et (H2) sont satisfaites. Puisque $V(\underline{G}, \tau = 0, W_2) > V(\underline{G}, 0, W_1)$ et $V(\underline{G}, \tau = \infty, W_2) < V(\underline{G}, 0, W_1)$, il existe nécessairement une date $\bar{\tau}$ finie telle que $V(\underline{G}, \bar{\tau}, W_2) = V(\underline{G}, 0, W_1)$. Toute valeur de τ inférieure à $\bar{\tau}$ sera telle que $V(\underline{G}, \bar{\tau}, W_2) > V(\underline{G}, 0, W_1)$, et inversement. Ceci prouve le résultat précédent.

La durée maximale d'apparition des nouvelles informations, au-delà de laquelle la politique de passage sera automatiquement préférée, est égale à :

$$\bar{\tau} = -\frac{1}{\delta} \cdot \ln \left(\frac{W_1 - u(C'_\infty)/\delta}{W_2 - u(C'_\infty)/\delta} \right). \quad (5.6)$$

Ce délai limite s'interprète comme un indice d'“impatience” du planificateur. Si les avancées scientifiques attendues arrivent avant la date limite, le décideur trouve justifié d'attendre avant de décider s'il doit ou non provoquer la catastrophe. Dans le cas contraire, l'attente lui paraît exagérée et il préfère accepter le risque de provoquer la catastrophe avant d'acquérir les informations complémentaires. La patience du planificateur est d'autant plus limitée que le gain attendu de l'information scientifique est réduit et que le taux d'actualisation est grand.

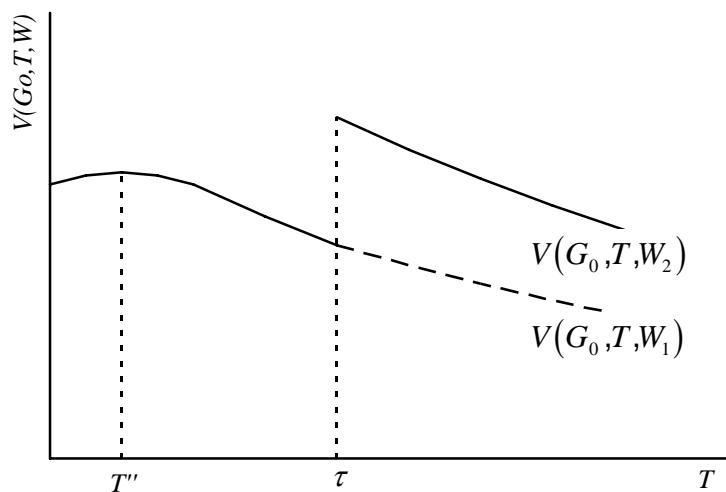
Il est plus difficile d'établir l'équivalent des résultats précédents dans le cas général où $G_0 < \underline{G}$. Par définition, la politique de passage optimale détermine le délai optimal T'' pour provoquer la catastrophe. On a donc $V(G_0, T'', W_1) > V(G_0, T, W_1)$, quelle que soit la date T . Il s'ensuit que l'action de retarder cette décision jusqu'en τ est nécessairement sous-optimale pour cette évaluation de l'héritage.

Mais, ce raisonnement est erroné. Le fait d'accepter ce délai procure, en fait, un avantage supplémentaire, égal à $(W_2 - W_1) \cdot e^{-\delta \cdot \tau}$. Dès lors, alors que l'on peut affirmer, sans risque d'erreur, que l'action de différer la catastrophe jusqu'en τ n'est pas rentable si elle n'est pas assortie d'un avantage supplémentaire, i.e. $V(G_0, T'', W_1) > V(G_0, \tau, W_1)$, on ne peut pas exclure la possibilité que cette même décision devienne acceptable quand elle s'accompagne d'une réévaluation de l'héritage de $(W_2 - W_1) \cdot e^{-\delta \cdot \tau}$ unités, résultant de la réduction de l'incertitude. Cela dépendra, comme dans le cas où $G_0 = \underline{G}$, de la rapidité des nouvelles découvertes scientifiques et de la différence entre W_1 et W_2 .

Le graphique 5.3 présente plus clairement les discussions précédentes. Nous y représentons deux courbes. La première correspond au gain intertemporel obtenu lorsque l'héritage est W_1 . Par définition, il est maximum lorsque la date de passage de la catastrophe est T'' . L'autre courbe donne le bien-être intertemporel quand l'héritage est W_2 . Puisqu'elle

n'a pas de sens avant l'instant τ des nouvelles découvertes scientifiques sur l'ampleur de la catastrophe, elle n'est dessinée qu'à partir de cette date. Si le décideur ignore les avantages procurés par ces nouvelles informations, il refuse de retarder l'instant de franchissement du seuil critique, puisque la première courbe est décroissante, ce qui traduit une perte de bien-être. Mais, dans la configuration représentée par ce graphique, on voit bien que ce comportement serait en fait une erreur puisque le gain obtenu à l'instant τ est supérieur au précédent.

Graphique 5.3 : Evolution du bien-être espéré en fonction du temps mis pour atteindre le seuil critique



5.1.3 - Valeur de quasi-option

Une valeur de quasi-option intervient dans l'évaluation d'un projet public ou privé à chaque fois que la réalisation dudit projet est irréversible et que les bénéfices correspondants sont incertains, mais susceptibles d'apprentissage au cours du temps (Arrow & Fisher, 1974 ; Henry, 1974 ; pour une synthèse, voir Desaigues & Point, 1990). Hanemann (1988) interprète ce concept comme la valeur attendue de l'information, conditionnelle au choix de ne pas prendre la décision irréversible avant qu'elle n'apparaisse.

Dans le scénario étudié précédemment, l'amélioration de la connaissance modifie le rendement de la stratégie de préservation d'une valeur égale à la valeur de quasi-option. Elle se calcule en

faisant la différence entre le gain de la politique de précaution et celui de la préservation :

$$VQO = V(G_0, \tau, E \left[\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\} \right]) - V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta), \quad (5.7)$$

où

θ désigne l'instant où la trajectoire de préservation atteint l'équilibre stationnaire \underline{G} ,

τ est l'instant où l'incertitude sur l'ampleur de la catastrophe disparaît.

La relation (5.8) se comprend de la façon suivante. Si les progrès scientifiques n'apparaissent jamais, ou si le planificateur ignore simplement la faculté d'apprentissage qui lui est offerte, le gain de la préservation de l'environnement est $V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta)$. Si les découvertes scientifiques lèvent toute incertitude sur l'ampleur de la catastrophe à une date τ , le gain de la préservation jusqu'à cet instant, assortie de l'opportunité de provoquer la catastrophe ensuite, devient égal à $V(G_0, \tau, E \left[\max \{u(C'_\infty)/\delta; W(\underline{G})\} \right])$; il correspond, en fait, au bénéfice de la stratégie de précaution. Lorsque la différence entre la seconde et la première est positive, la valeur de quasi-option est positive.

Théorème 5.2 : Si les hypothèses (H1), (H2) et (H3) sont satisfaites, la valeur de quasi-option est toujours strictement positive.

Preuve : voir l'annexe 5.1.

Le théorème 5.2 prouve que le planificateur commet une erreur lorsqu'il décide la stratégie à suivre en comparant le gain certain de la préservation et l'espérance du gain de la trajectoire de passage. En effet, ce faisant, il sous-estime le gain de la préservation, car il omet d'y associer le bénéfice attendu de l'information à venir, représenté par la valeur de quasi-option.

5.2 - Incertitude sur l'échéance de la catastrophe

Imaginons maintenant que la valeur du seuil critique \underline{G} soit une variable aléatoire dont la densité de probabilité $h(G)$ est connue, avec $h'(G) \geq 0$. Ce cas de figure se rencontre lorsque

l'échéance de la catastrophe est incertaine, autrement dit lorsqu'on ne connaît pas précisément la valeur du seuil critique.

Pour résoudre ce problème, il faut distinguer deux périodes successives, l'une avant, et l'autre après la catastrophe, comme dans le problème n°3. Par contre, la date de transition T à laquelle la catastrophe se produit devient une variable aléatoire. Sa distribution de probabilité se déduit de celle de \underline{G} . Soit $\omega(t)$ la densité de probabilité de T et $\Omega(t) = \int_t^\infty \omega(\tau) d\tau$ la probabilité que la catastrophe ait lieu après l'instant t inclus. La probabilité que la catastrophe soit imminente, sachant qu'elle n'a pas encore été subie, s'écrit $\omega(t)/\Omega(t) = h(G(t))$ (Clarke & Reed, 1994 ; Roe & alli, 1994). Le fait d'exprimer la probabilité de catastrophe en fonction du temps donne un problème formellement identique à celui de Dasgupta & Heal (1974). Ceci permet de tirer profit d'une méthode de résolution ingénieuse qu'ils suggèrent dans leur proposition 9. Nous reprenons leur démarche ci-dessous.

Nous supposons que le planificateur politique cherche à maximiser l'espérance mathématique du bien-être intertemporel :

$$\max_{g(t)} \left\{ E \left[\int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt + e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G}) \right] \right\}. \quad (5.8)$$

En utilisant la densité de probabilité $\omega(t)$, on peut écrire :

$$(5.8) \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^\infty \omega(T) \left[\int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt + e^{-\delta T} \cdot W(\underline{G}) \right] dT. \quad (5.9)$$

En intégrant par partie l'expression (5.9), on trouve (voir l'annexe 5.2) :

$$(5.8) \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot [\Omega(t) \cdot u(C(t)) + \omega(t) \cdot W(\underline{G})] dt. \quad (5.10)$$

Comme $\Omega'(t) = -\omega(t)$ et $\omega(t)/\Omega(t) = h(G(t))$, on a $\Omega(t) = e^{-\int_0^t h(G(\tau)) d\tau}$. En posant $\Psi(t) = \int_0^t h(G(\tau)) d\tau$ et en remplaçant $\Omega(t)$ par $e^{-\Psi(t)}$ dans (5.11), on obtient :

$$(5.8) \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t - \Psi(t)} [u(C(t)) + h(G(t)) \cdot W(\underline{G})] dt. \quad (5.11)$$

Ainsi, la méthode inspirée par Dasgupta & Heal conduit finalement à traiter le risque de catastrophe comme un facteur d'actualisation. Elle oblige à introduire une variable d'état supplémentaire, i.e. $\Psi(t)$. On en vient à formuler le programme (5.8) de la manière suivante :

Problème n°6 :

$$\max_{g(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t - \Psi(t)} [u(C(t)) + h(G(t)) \cdot W(\underline{G})] dt \quad (5.12)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = g(t) - \beta \cdot G(t), \quad (5.12a)$$

$$\dot{\Psi}(t) = h(G(t)), \quad (5.12b)$$

$$C(t) \equiv Q(t) = f(g(t), G(t)), \quad (5.12c)$$

$$G(0) = G_0, \quad (5.12d)$$

$$g(t) \geq 0, \quad \forall t. \quad (5.12e)$$

5.2.1 - Résolution

Les conditions d'optimalité sont déduites du Hamiltonien :

$$\tilde{H}(G, y, g, P, \Phi, t) = e^{-\Psi} [u(f(g, G)) + h(G) \cdot W(\underline{G})] - P \cdot (g - \beta \cdot G) + \Phi \cdot h(G). \quad (5.13)$$

désignant la solution du problème posé, il existe $P(t)$ et $\Phi(t)$ continues et dérivables telles que :

$$e^{-\Psi} \cdot f_g(\hat{g}, \hat{G}) \cdot u'(f(\hat{g}, \hat{G})) = P, \quad (5.14)$$

$$\dot{P} = (\delta + \beta) \cdot P + e^{-\Psi} \cdot f_G(\hat{g}, \hat{G}) \cdot u'(f(\hat{g}, \hat{G})) + h'(\hat{G}) \cdot (e^{-\Psi} \cdot W(\underline{G}) + \Phi), \quad (5.15)$$

$$\dot{\Phi} = \delta \cdot \Phi + e^{-\hat{\Psi}} \cdot \left[u\left(f\left(\hat{g}, \hat{G}\right)\right) + h\left(\hat{G}\right) \cdot W(\underline{G}) \right]. \quad (5.16)$$

En procédant aux changements de variables $p = e^{\Psi} \cdot P$ et $\phi = e^{\Psi} \cdot \Phi$, les conditions d'optimalité (5.14) à (5.16) deviennent :

$$f_g\left(\hat{g}, \hat{G}\right) \cdot u'\left(f\left(\hat{g}, \hat{G}\right)\right) = p, \quad (5.14')$$

$$\dot{p} = \left(\delta + \beta + h\left(\hat{G}\right)\right) \cdot p + f_G\left(\hat{g}, \hat{G}\right) \cdot u'\left(f\left(\hat{g}, \hat{G}\right)\right) + h'\left(\hat{G}\right) \cdot (W(\underline{G}) + \phi), \quad (5.15')$$

$$\dot{\phi} = \left(\delta + h\left(\hat{G}\right)\right) \cdot \phi + u\left(f\left(\hat{g}, \hat{G}\right)\right) + h\left(\hat{G}\right) \cdot W(\underline{G}). \quad (5.16')$$

Les conditions de transversalité sont :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \hat{P}(t) \cdot \hat{G}(t) = 0, \quad (5.17)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \hat{\Phi}(t) \cdot \hat{\Psi}(t) = 0. \quad (5.18)$$

5.2.2 - Effet de l'incertitude sur l'équilibre stationnaire

La comparaison des équilibres stationnaires du système, pour différents cas de figure, donne une idée de l'effet de l'incertitude sur la trajectoire optimale. La situation où il n'y a aucun risque de catastrophe, i.e. $h(G) = 0$, $\forall G$, a déjà été amplement analysée dans le chapitre 1. La relation suivante caractérise alors l'équilibre stationnaire (elle s'obtient en combinant les relations (1.11) à (1.13)) :

$$(\delta + \beta) \cdot f_g\left(\beta \cdot G_{\infty}^*, G_{\infty}^*\right) + f_G\left(\beta \cdot G_{\infty}^*, G_{\infty}^*\right) = 0. \quad (5.19)$$

Dans l'hypothèse générale, où il existe un risque de catastrophe positif et croissant avec le stock de pollution, l'équilibre stationnaire du problème n°6 est caractérisé par :

$$(\delta + \beta) \cdot f_g\left(\beta \cdot \hat{G}_{\infty}, \hat{G}_{\infty}\right) + f_G\left(\beta \cdot \hat{G}_{\infty}, \hat{G}_{\infty}\right) = \Lambda, \quad (5.20)$$

avec

$$\Lambda = -h(\hat{G}_\infty) \cdot f_g(\beta \cdot \hat{G}_\infty, \hat{G}_\infty) + h'(\hat{G}_\infty) \cdot \frac{u(f(\beta \cdot \hat{G}_\infty, \hat{G}_\infty)) - \delta \cdot W(\underline{G})}{(\delta + h(\hat{G}_\infty)) \cdot u'(f(\beta \cdot \hat{G}_\infty, \hat{G}_\infty))}.$$

Puisque le terme de gauche de (5.19) et (5.20) est décroissant avec G , la pollution stationnaire \hat{G}_∞ en présence d'un risque de catastrophe positif sera plus ou moins grande que G_∞^* selon que Λ est négatif ou positif respectivement.

Remarque 5.1 : L'équilibre stationnaire du problème n°6 renseigne uniquement sur la direction du système. Si la catastrophe survient à une date finie, il ne sera en effet jamais rejoint.

Supposons, dans un premier temps, que $h(G) = x^{-1}$. Dans ce cas, le risque de catastrophe ne dépend pas de la pollution mais augmente de manière autonome avec le temps. On a alors $\Lambda = -h(\hat{G}_\infty) \cdot f_g(\beta \cdot \hat{G}_\infty, \hat{G}_\infty) < 0$ et $\hat{G}_\infty > G_\infty^*$. Le théorème 5.2 détermine la dynamique de transition vers cet équilibre stationnaire.

Théorème 5.2 : La dynamique optimale sous la menace d'une catastrophe dont la probabilité de réalisation instantanée est autonome et égale à x par unité de temps est confondue avec celle du problème n°1 lorsque le taux d'actualisation est égal à $\delta + x$.

Preuve : l'équation différentielle de la variable d'état (5.12b) s'écrit $\dot{\Psi}(t) = x$, ce qui implique que $\Psi(t) = x \cdot t$, sachant que $\Psi(0) = 0$. Le problème devient donc :

$$\max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-(\delta+x)t} \cdot [u(C(t)) + x \cdot W(\underline{G})] dt \Leftrightarrow \max_{g(t)} \int_0^\infty e^{-(\delta+x)t} \cdot u(C(t)) dt + \frac{x \cdot W(\underline{G})}{\delta + x}.$$

La second terme est constant quelle que soit la trajectoire suivie, ce qui prouve le théorème.

¹ - Dans ce cas, les distributions de probabilité de T et de \underline{G} suivent une loi exponentielle de paramètre $-x$ (Kiefer, 1988).

La trajectoire optimale associée au cas $h(G) = x$ est donc plus laxiste en matière de gestion du climat. Le fait que la probabilité de catastrophe soit autonome, donc fonction du temps uniquement, pousse à émettre plus de gaz à effet de serre à court terme, le risque de ne pas pouvoir tirer les bénéfices futurs escomptés agissant comme un facteur d'actualisation. La gravité de la catastrophe n'intervient pas dans le choix optimal et la même trajectoire est suivie quelle que soit la valeur de $W(\underline{G})$.

Supposons maintenant que l'accumulation des gaz à effet de serre augmente les chances d'apparition de la catastrophe, i.e. $h'(G) > 0$. L'émission de gaz à effet de serre influence alors le risque de catastrophe, ce qui incite à la réduire par rapport au cas précédent. Le terme Λ est positif si $h'(\hat{G}_\infty)$ est grand et/ou si $W(\overline{G})$ est petit. Ainsi, le planificateur, confronté à un risque de catastrophe majeur très sensible à l'accumulation supplémentaire de polluants, réduira plus fortement l'émission de gaz à effet de serre que dans le cas du problème n°1.

5.3 - Conclusion

Deux sujets sont abordés dans ce chapitre. Le premier reformule le problème des catastrophes de la manière suivante : l'échéance de la catastrophe est connue, pas sa gravité ; des progrès scientifiques sur la connaissance du système climatique arrivent après un délai donné ; l'incertitude sur l'ampleur de la catastrophe disparaît à ce moment. Cette séquence d'événements est, à notre avis, tout à fait représentative des mécanismes de décision par étapes dans les problèmes globaux d'environnement (Protocole de Montréal, négociations sur le climat). Elle éclaire un autre aspect de la politique du climat.

Nos résultats prouvent que le planificateur sous-estime la stratégie de préservation s'il néglige les perspectives d'apprentissage future. En fait, pour évaluer correctement cette option, le décideur doit y associer une valeur de quasi-option, qui reflète l'avantage procuré par l'information scientifique et par l'opportunité d'un choix non risqué à l'avenir grâce à cette découverte. Ce résultat a un corollaire : le fait de négliger les progrès dans la connaissance

des catastrophes introduit un biais dans le sens d'un choix plus systématique de la stratégie de passage.

Il est tentant d'exploiter ces conclusions pour étudier l'attitude des décideurs politiques. Notamment, Kolstad (1994) rapporte le débat opposant le Président Bush et le Vice-président Al Gore sur la politique climatique à entreprendre. Le premier justifiait l'inaction et l'attentisme par la densité des incertitudes dans la connaissance des phénomènes climatiques. Le Congrès américain, lui aussi réticent vis-à-vis d'une limitation immédiate des émissions, a finalement retenu cette position (aujourd'hui encore, elle reflète bien l'attitude des Etats-Unis). Il l'a assortie, par contre, d'un programme de recherche scientifique dynamique. Ainsi, le "Global Change Research Program" s'est vu attribué un financement en forte croissance, de 659 à 955 millions de dollars entre 1990 et 1991 (Brunner, 1991). A l'inverse, le sentiment de Al Gore, inspiré par l'irréversibilité de l'accumulation des gaz à effet de serre et par le risque d'une confirmation scientifique des dangers climatiques, suggérait de mettre en place une mesure de limitation immédiate des émissions de carbone.

En fait, les deux attitudes relèvent d'un même raisonnement, qui se comprend par l'existence d'une valeur de quasi-option positive. Pour "capter" les gains potentiels de l'amélioration des connaissances, qui sont mesurés par la valeur de quasi-option, l'important est de s'assurer que les éclaircissements scientifiques précèdent les premiers risques tangibles de catastrophes climatiques irréversibles. Or, de ce point de vue, les deux options susdites aboutissent, par des biais différents, au même résultat : la première politique vise à accélérer les progrès de la connaissance, tandis que la seconde repousse les risques en limitant les émissions de carbone².

Le second cas de figure analysé dans ce chapitre s'énonce comme suit : l'ampleur de la catastrophe est connue, pas son échéance. Il est analysé plus brièvement car nous

² - Cette équivalence du point de vue des résultats est en partie inexacte. En effet, compte tenu de l'inertie climatique des océans, estimée entre 20 et 30 ans, notre capacité de réaction est limitée et il faudrait être capable d'anticiper les risques majeurs sur un horizon très long.

n'introduisons rien de nouveau par rapport à la littérature (Clarke & Reed, 1994 ; Roe & alli, 1994). Deux résultats ressortent de cette synthèse :

- lorsque le risque de catastrophe croît de façon autonome avec le temps, la crainte de la catastrophe et la conscience de ne pas pouvoir influencer sa réalisation incitent à polluer plus ;
- lorsque le risque de catastrophe croît avec la pollution et lorsque le dommage qui lui est associé est grand, la réaction optimale consiste à limiter les émissions plus fortement.

Ces discussions concluent cette seconde partie et mettent un point final à la description du programme mondial de gestion du climat. A partir de maintenant, nous changeons radicalement d'optique puisque nous quittons la question normative de la meilleure réaction collective pour d'étudier ce que les pays pourraient accepter de faire de leur propre initiative. Dans la troisième partie, nous mettons donc l'accent sur les composantes stratégiques de la gestion du climat.

Annexe 5.1 : Démonstration du théorème 5.2

Lorsque $\tau \geq \theta$, les trajectoires de préservation et de précaution sont confondues. Il s'ensuit que $V(G_0, \tau, W_2) - V(G_0, \theta, u(C'_\infty)/\delta) = e^{-\delta\tau} \cdot \{W_2 - u(C'_\infty)/\delta\}$. Si les hypothèses (H1) et (H2) sont satisfaites, on en déduit que la valeur de quasi-option est strictement positive quelle que soit $\tau \geq \theta$.

Il suffit alors de prouver que $V(G_0, \tau, W_2)$ est une fonction décroissante de τ pour déduire que la valeur de quasi-option est toujours strictement positive. Or, en adaptant le résultat de l'appendice 2, on sait que :

$$\frac{\partial V(G_0, \tau, W_2)}{\partial \tau} = e^{-\delta\tau} \cdot [\tilde{H}^0(\underline{G}, p'''(\tau)) - \delta \cdot W_2].$$

Sachant que :

- la trajectoire de passage optimale vérifie la condition de transversalité $\tilde{H}^0(\underline{G}, p''_T) = \delta \cdot W_1$ (voir le lemme 4.2) ;
- $\tilde{H}^0(\underline{G}, p)$ est une fonction décroissante de p ;
- $p'''(\tau) > p''_T$ si (H3) est vérifiée ;
- $W_1 < W_2$ si (H2) est satisfaite ;

on démontre que :

$$\tilde{H}^0(\underline{G}, p'''(\tau)) < \tilde{H}^0(\underline{G}, p''_T) = \delta \cdot W_1 < \delta \cdot W_2.$$

Il s'ensuit que $V(G_0, \tau, W_2)$ décroît avec τ et que la valeur de quasi-option est toujours positive.

Annexe 5.2 : Démonstration de (5.11)

On part de :

$$\int_0^\infty \omega(T) \left[\int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt \right] dT + \int_0^\infty e^{-\delta T} \cdot \omega(T) \cdot W(\bar{G}) dT.$$

$\Omega(t) = \int_t^\infty \omega(\tau) d\tau$ mesure la probabilité que la catastrophe se produise après l'instant t . La probabilité complémentaire est donnée par l'expression suivante :

$$\Omega^C(T) = \int_0^\infty \omega(\tau) d\tau - \Omega(T) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau.$$

En intégrant par partie le premier terme de l'expression de départ, on obtient

$$\left[\Omega^C(T) \cdot \int_0^T e^{-\delta t} \cdot u(C(t)) dt \right]_0^\infty - \int_0^\infty e^{-\delta T} \cdot \Omega^C(T) \cdot u(C(T)) dT + \int_0^\infty e^{-\delta T} \cdot \omega(T) \cdot W(\bar{G}) dT,$$

ce qui donne

$$\int_0^\infty e^{-\delta T} \left[\Omega(T) \cdot u(C(T)) + \omega(T) \cdot W(\bar{G}) \right] dT.$$

Partie III

Composantes stratégiques

Chapitre 6

Jeux dynamiques de l'effet de serre

Les discussions des chapitres précédents postulent qu'une instance internationale, que nous avons baptisée "planificateur", anticipe la meilleure réponse de l'Humanité au renforcement constaté de l'effet de serre, puis prend les mesures nécessaires pour la faire appliquer par tous. Ce scénario est une abstraction puisqu'aucun organisme ne peut tenir ce rôle. Dans la réalité, la décision d'appliquer une telle politique reste la prérogative des gouvernements nationaux. Si ceux-ci sont animés par des intentions différentes, alors les politiques climatiques nationales différeront de la proposition du planificateur imaginaire.

De fait, si elles se mesurent en termes de bénéfice net et si l'on en croît les évaluations économiques disponibles, les motivations nationales pour atténuer l'effet de serre s'avèrent très hétérogènes. D'une part, les dommages climatiques se répartissent de façon très inégalitaire entre les différentes régions du monde. Selon les estimations de Tol (1994), les pays en développement seraient les plus vulnérables et pourraient subir un coût équivalent à 8,6 pour-cent de leur P.I.B., dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration d'équivalent dioxyde de carbone. A l'autre extrémité, l'ex-U.R.S.S., les pays d'Europe centrale et le Canada n'endureraient qu'une perte limitée, voire négative, si un réchauffement de cette amplitude se produisait. De toute évidence, les intérêts de ces régions divergent et il sera difficile de trouver un terrain d'entente.

D'autre part, les coûts de la réduction des émissions de carbone varient sensiblement d'une région à l'autre. Par exemple, la Chine, l'Inde, l'Ex-U.R.S.S. et d'autres pays subventionnent fortement la consommation d'énergies fossiles. De ce fait, ils disposent de gisements d'économies d'énergie inexploités, ce qui laisse entrevoir des possibilités de réduction des émissions de gaz carbonique à moindre coût. La situation est totalement différente au Japon et dans les pays d'Europe occidentale, où les énergies fossiles sont déjà fortement taxées et où toute économie supplémentaire impliquerait, a priori, un coût élevé.

Du fait que les conséquences climatiques seront partagées, les émissions d'un pays quelconque concernent pourtant les pays étrangers. Cette interaction, caractéristique des pollutions transfrontières globales, complique singulièrement le problème, mais la théorie des jeux fournit le cadre approprié pour l'analyser.

La répétition des situations d'interdépendance et la persistance du polluant nécessitent de représenter ce problème sous la forme d'un jeu différentiel¹. Basar & Olsder (1982, p. 210) définissent les jeux différentiels comme « des jeux dynamiques en temps continu, dans lesquels l'évolution de l'état du système est décrit par une équation différentielle »². Dans les jeux répétés, cette construction s'impose chaque fois que l'état de l'environnement influence les décisions courantes (Fudenberg & Tirole, 1991). Ainsi, dans l'exemple de l'effet de serre, les décisions passées se ressentent dans l'état du système climatique et influencent, à travers ce dernier, les décisions à prendre aujourd'hui.

Cette théorie est appliquée à l'effet de serre par Cesar (1994), Gottinger (1991), Hoel (1991b), Mäler (1991) et van der Ploeg & de Zeeuw (1992). Il est difficile de dégager une vision unifiée à la lecture de ces articles, du fait des hypothèses spécifiques posées par chaque auteur. Hoel (1991b) et Mäler (1991) concluent à une pollution stationnaire identique, que les pays coopèrent ou non. Ce résultat étonnant découle entièrement de la dynamique du stock de polluant qu'ils retiennent : pour le premier, le gaz à effet de serre est persistant, i.e. jamais recyclés ; pour le second, le stock de gaz à effet de serre se régénère d'une quantité constante à toute date. A long terme, l'issue du jeu passant forcément par une stabilisation de la pollution, ces hypothèses ont des conséquences fortes sur le résultat. Dans ces circonstances, la seule différence entre les stratégies coopérative et non coopérative se trouve dans le temps mis par le système pour atteindre les pollutions stationnaires, i.e. plus rapide si les pays agissent unilatéralement. Gottinger (1991) parvient au même résultat d'une pollution stationnaire invariable quelle que soit la stratégie, rejoints toutefois plus rapidement lorsque les pays adoptent un comportement non coopératif. Là encore, cette conclusion paraît très sensible aux hypothèses du modèle, principalement à l'existence d'un seuil critique de

¹ - Une modélisation analogue pourrait être formulée sous la forme d'un jeu dynamique en temps discret.

² - « Continuous time dynamic games wherein the state is described by a differential equation. »

pollution au-delà duquel la production devient nulle. En effet, dans ce cas, nul pays n'a intérêt à ce que cette limite environnementale soit dépassée, quelle que soit la stratégie adoptée. Cesar (1994) et van der Ploeg & de Zeeuw (1992) adoptent les hypothèses standards du modèle de pollution cumulative, celles d'un taux de recyclage constant du polluant et de dommages augmentant graduellement avec la pollution. Avec ce jeu d'hypothèses, il n'y a donc plus un équilibre stationnaire contraint, mais une infinité d'équilibres possibles. Ceci explique qu'ils aboutissent à des conclusions totalement différentes et qu'ils démontrent que la pollution stationnaire coopérative est plus faible que la pollution stationnaire non coopérative. Le seul résultat commun à tous ces travaux pose que la coopération répartit l'émission globale entre les pays de manière à uniformiser l'utilité marginale des émissions.

Ce chapitre sera découpé en trois sections. Dans la première, le problème n°1 sera récrit sous la forme d'un jeu différentiel de l'effet de serre. La solution coopérative sera étudiée en premier lieu. Nous dégagerons deux conditions, l'une concernant l'agrégation des demandes d'émission et l'autre l'agrégation des dommages marginaux nationaux, telles que la trajectoire obtenue coïncide avec la solution optimale du problème n°1. Nous verrons que la deuxième condition ne fonctionne correctement que si le dommage de l'effet de serre ne dépend pas de la production, si bien qu'une étude spécifique du sentier coopératif s'impose malgré tout. Nous étudierons ensuite les stratégies non coopératives. Compte tenu des caractéristiques du modèle, nous confirmerons les conclusions de Cesar (1994) et van der Ploeg & de Zeeuw (1992), selon lesquels la pollution stationnaire non coopérative est plus forte que la pollution stationnaire coopérative.

La seconde section présentera une description comparative des résultats des deux seuls jeux dynamiques appliqués consacrés à l'effet de serre (Tahvonen, 1994 ; Nordhaus & Yang, 1996). Les désaccords entre ces deux études sont nombreux et significatifs, au point de justifier une certaine méfiance vis-à-vis des résultats. La collation proposée dans cette seconde section et les tentatives d'harmonisation suggérées montreront les causes principales de ces divergences (le paramétrages et les méthodes d'analyse). Elles prouveront la plus grande fiabilité des résultats de Nordhaus & Yang.

A chaque étape du jeu dynamique de l'effet de serre, le décideur national retrouve toujours la même situation. Schématiquement, il arbitre entre la coopération et son équilibre de Nash. La première solution est collectivement préférée mais l'issue dominante est l'équilibre de Nash. Constatant la similitude avec la configuration classique du dilemme du prisonnier, nous évoquerons, dans la dernière section, les difficultés de l'application de la politique coopérative. Nous indiquerons des stratégies de menaces qui rendent la coopération possible sur des critères purement individualistes.

6.1 - Production - Pollution avec plusieurs pays

Le jeu différentiel de l'effet de serre se construit en “désagrégéant” le problème n°1. Chaque pays se conçoit comme une unité de décision indépendante, incarnée par un décideur politique national. Par hypothèse, son rôle se limite à la défense des intérêts de ses citoyens. Il prend ses décisions à la lumière d'une fonction de bien-être social, qui mesure l'utilité des agents économiques sous son autorité. Son souci est d'assurer le niveau de bien-être intertemporel le plus grand possible à l'ensemble des générations de citoyens qu'il représente.

Problème n°6 :

$$\max_{g_i(t)} \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot u_i(C_i(t)) dt . \quad (6.1)$$

sous les contraintes

$$\dot{G}(t) = \sum_i g_i(t) - \beta \cdot G(t) , \quad (6.1a)$$

$$C_i(t) \equiv Q_i(t) = f^i(g_i(t), G(t)) , \quad (6.1b)$$

$$G(0) = G_0 , \quad (6.1c)$$

$$g_i(t) \geq 0 , \quad \forall i , \quad \forall t . \quad (6.1d)$$

Les fonctions que nous utilisons ont les mêmes propriétés que pour le problème n°1. Nous ne les rappelons donc pas.

La relation (6.1a) est le cœur du problème. Le planificateur ne décide pas seul de l'avenir de ses concitoyens car il partage avec d'autres la gestion du climat. Les décisions étrangères influencent, en partie, l'évolution de la pollution et conditionnent, en retour, les possibilités de production du pays. Cette interdépendance implique que le planificateur choisisse sa trajectoire d'émission nationale $g_i(t)$ en fonction des décisions prises hors de ses frontières $g_{-i}(t)$. Ainsi, nous noterons $v_i(G_0, g_i, g_{-i}) = \int_0^\infty e^{-\delta t} \cdot u_i(C_i(t)) dt$ le bien-être intertemporel du pays i lorsqu'il émet $g_i(t)$, sachant que ses partenaires rejettent $g_{-i}(t)$.

6.1.1 - Structures d'information

Puisque les décisions des joueurs sont interdépendantes, la structure d'information du jeu influence directement les choix stratégiques en renseignant les joueurs sur les stratégies des autres. La théorie des jeux différentiels impose la restriction Markovienne, selon laquelle les stratégies des joueurs dépendent seulement de l'état du système et du temps. Dans le jeu différentiel de l'effet de serre, les stratégies dépendent du stock de gaz à effet de serre, mais pas du temps, car le jeu est stationnaire³. La justification de la restriction Markovienne part du principe que la connaissance de l'état suffit pour informer pleinement les joueurs sur l'histoire du jeu depuis l'origine. D'autre part, la restriction Markovienne garantit la cohérence des choix puisque les joueurs, confrontés à une même situation, en l'occurrence, à un état donné du système, conduiront toujours le même raisonnement.

Dans le jeu différentiel de l'effet de serre, la structure d'information dépendra de la capacité des joueurs à surveiller l'évolution de la pollution. A l'instant t , l'information détenue par le joueur i se résume ainsi au dernier relevé de pollution qu'il ait fait : $I_i(t) = [G(T), T \in [0, t]]$.

³ - Fudenberg & Tirole (1991, p.521) définissent les jeux stationnaires comme « des jeux dans lesquels h_t^j [les équations différentielles des variables d'état] ne dépendent pas de t [le temps] et les g_i^t [les fonctions d'utilité] prennent la forme $g_i \cdot e^{-rt}$. »

Parmi l'infinité d'hypothèses possibles, la littérature retient deux cas. La structure d'information est dite en “boucle ouverte” lorsque chaque joueur ne connaît que la pollution au commencement du jeu : $I_i(t) = [G_0]$, $\forall t, \forall i$. La structure d'information est dite en “boucle fermée” lorsque chaque joueur observe l'évolution de la variable d'état à chaque instant : $I_i(t) = [G(t)]$, $\forall t, \forall i$.

La stratégie du joueur i consiste à choisir son émission de gaz à effet de serre compte tenu de la connaissance qu'il a de la pollution : $g_i(t) = A_i(I_i(t), t)$, avec $A_i \geq 0$. Avec la structure d'information en boucle ouverte, le joueur se contente de connaître la pollution à l'origine du jeu pour conduire ses choix : $g_i(t) = A_i(G_0, t)$. Il élabore sa stratégie, à toute date, en conjecturant que ses partenaires adopteront leur stratégie optimale et en anticipant, dès l'instant initial, le sentier de pollution correspondant. Sa stratégie optimale consiste alors à rechercher la meilleure réponse aux stratégies des autres joueurs. Cette anticipation garantit la cohérence temporelle faible des choix : quelle que soit la date intermédiaire à laquelle le jeu serait stoppé, le long de la trajectoire optimale, puis recommencé, les pays redéfiniraient leur stratégie de telle manière que la trajectoire poursuivie coïnciderait avec la trajectoire originelle (Cesar, 1994 ; Hoel, 1992). Par contre, il n'y a pas cohérence forte car, si le jeu s'écarte de la trajectoire anticipée, l'action de le stopper, donc d'informer les joueurs sur l'état avéré du système, les conduirait à ajuster leur stratégie à la nouvelle donnée et à faire des choix différents.

Avec la structure d'information en boucle fermée, le joueur redéfinit instantanément sa stratégie en fonction de l'évolution de la pollution : $g_i(t) = A_i(G(t), t)$. Sa stratégie optimale est déterminée “au jour le jour”, puisqu'on a $\partial A_i(G(t), t) / \partial G(t) \neq 0$. Cette structure d'information assure la cohérence stricte des choix : quel que soit le point à partir duquel le jeu reprendrait, qu'il soit ou non sur la trajectoire optimale, les stratégies optimales des joueurs restent inchangées et prolongent toujours la même trajectoire optimale (Cesar, 1994).

Bien que l'information en boucle ouverte soit peu réaliste, Cesar (1994) défend cette hypothèse car l'observation de l'atmosphère est difficile ; la coopération internationale

devrait reposer, selon lui, sur la confiance. Pourtant, la Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992) met au premier plan l'obligation d'information de chaque partie contractante sur ses émissions de gaz à effet de serre et sur les mesures de dépollution qu'elle engage (Article 4, paragraphe 1, alinéas a et b). Le traité va plutôt dans le sens d'une surveillance mutuelle et contredit les arguments de Cesar. De plus, la surveillance des comportements étrangers n'est pas forcément très coûteuse car beaucoup d'indices, autres que l'évolution de l'atmosphère, peuvent renseigner sur les actions entreprises à l'étranger : la fiscalité énergétique, les importations d'énergies primaires, le reboisement... Ces éléments incitent à préférer une modélisation basée sur une information en boucle fermée.

6.1.2 - Stratégies coopératives

Le scénario envisagé dans cette section reprend l'hypothèse de Cesar (1994). Il suppose que les pays se mettent d'accord pour agir conjointement. Préalablement, ils ont négocié un traité mondial de coopération, qui stipule qu'ils chercheront à maximiser la fonction de bien-être intertemporel collective suivante :

$$\max_{\vec{g}} \sum_i \varpi_i \cdot v_i(G_0, g_i, g_{-i}), \quad (6.2)$$

où $\vec{g} = (g_1, g_2, \dots, g_N)$ représente le vecteur des émissions.

Nous laissons de côté l'analyse de la procédure de négociation qui conduit à la définition d'une telle fonction. Disons simplement que les coefficients ϖ_i mesurent les poids des pays dans le traité de coopération et qu'ils dépendent de leur pouvoir de négociation relatif.

6.1.2.1 - Résolution ⁴

Le problème (6.2) associé aux contraintes (6.1a) à (6.1d) perd sa spécificité de jeu différentiel et se résout exactement de la même façon que dans les chapitres précédents ⁵.

⁴ - Voir l'appendice 1.

⁵ - La seule différence est qu'il n'y a plus une mais plusieurs variables de contrôle.

On commence par écrire la fonction Hamiltonienne courante :

$$\tilde{H}(G, \vec{g}, p) = \sum_i \bar{\omega}_i \cdot u_i(f^i(g_i, G)) - p \cdot \left[\sum_i g_i - \beta \cdot G \right]. \quad (6.3)$$

$p(t)$ étant la variable adjointe associée à G , la solution optimale $\langle \vec{g}^*(t), G^*(t) \rangle$ vérifie les conditions d'optimalité du premier ordre suivantes :

$$f_{g_i}^i(g_i^*, G^*) \cdot u'_i(f^i(g_i^*, G^*)) = p/\bar{\omega}_i, \quad \forall i, \quad (6.4)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + \sum_i \bar{\omega}_i \cdot f_G^i(g_i^*, G^*) \cdot u'_i(f^i(g_i^*, G^*)), \quad (6.5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot p^*(t) \cdot G^*(t) = 0. \quad (6.6)$$

Puisque chaque fonction $u_i(f^i(g_i, G))$ est concave (voir l'annexe 1.1) et puisque \dot{G} est linéaire, le Hamiltonien $\tilde{H}(G, \vec{g}, p)$ est concave en (G, \vec{g}) , quelle que soit t , et les conditions nécessaires (6.4) à (6.6) sont également conditions suffisantes d'optimalité (voir l'appendice 1, théorème 2 et son corollaire).

La condition (6.4) implique que la productivité marginale de l'émission du pays i est égale au rapport du prix de la pollution et du poids du pays dans l'accord de coopération. Implicitement, elle définit la demande d'émission de chaque pays :

$$g_i^* = g_i(G, p/\bar{\omega}_i). \quad (6.7)$$

Puisque les fonctions ont les mêmes propriétés que dans le chapitre 1, le lemme 1.1 s'applique. On sait donc que l'émission optimale décroît avec la pollution et avec son prix. En outre, plus le poids du pays dans le traité est grand, plus son émission est importante.

Désignons par $p_i(t)$ le dommage intertemporel encouru par le pays i lorsque l'émission mondiale augmente d'une unité à la date t . On démontre que :

$$p_i(t) = - \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot f_G^i(g_i, G) \cdot u'_i(f^i(g_i, G)) d\tau. \quad (6.8)$$

Les coefficients de pondération du traité de coopération n'apparaissent pas dans la relation (6.8). De ce fait, quel que soit l'accord, cette valeur est invariante.

Propriété 6.1 : le prix de la pollution est égal à la somme des dommages marginaux intertemporels de chaque pays, pondérés par les coefficients de négociation du traité de coopération.

$$p(t) = \sum_i \varpi_i \cdot p_i(t). \quad (6.9)$$

Preuve : voir l'annexe 6.1.

Dans le cas particulier où le coefficient de pondération attribué à chaque joueur est unitaire, le prix de la pollution est la somme des dommages marginaux intertemporels nationaux. Il s'interprète donc comme le prix implicite mondial de l'accumulation du gaz à effet de serre. Sinon, la taxe sur les émissions reflète à la fois le prix implicite mondial des émissions et le pouvoir de négociation des pays signataires de l'accord de coopération.

L'émission optimale égalise l'utilité marginale de la pollution à son prix implicite lorsque les coefficients sont unitaires, au prix négocié dans le cas contraire. Là encore, le rôle des coefficients de négociation est intéressant à observer :

$$f_{g_i}^i(g_i^*, G^*) \cdot u'_i(f^i(g_i^*, G^*)) = p_i + \sum_{j \neq i} \frac{\varpi_j}{\varpi_i} \cdot p_j. \quad (6.10)$$

Cette relation montre que les pays internalisent toujours la totalité des dommages subis sur leur territoire. Par contre, du fait des coefficients de négociation, ils internalisent des dommages étrangers plus grands ou moins grands que leur valeur réelle selon leur poids relatif par rapport à leurs partenaires.

6.1.2.2 - Agrégation et politique coopérative du climat

Le problème n°1 du chapitre 1 s'interprète de la manière suivante : la fonction de production mondiale $f(g, G)$ calcule la quantité de biens de consommation produite lorsque l'émission mondiale est égale à g et lorsque la pollution est égale à G ; le planificateur, identifiable au traité de coopération défini dans ce chapitre pour le cas où tous les pays ont le même poids dans l'accord, utilise une fonction d'utilité collective pour mesurer le bien-être mondial ; la solution obtenue détermine le sentier d'émission qui permet le plus grand bien-être intertemporel global.

En principe, la solution du problème n°1 et la solution coopérative étudiée dans ce chapitre sont confondues. Si tel est le cas, à quelques détails près, les résultats du chapitre 1 suffisent pour décrire la solution recherchée ici. Les deux conditions suivantes sont nécessaires pour que l'on vérifie effectivement cette propriété :

$$g(G, p) \equiv \sum_i g_i(G, p), \quad (6.11)$$

$$f_G(g, G) \cdot u'(f(g, G)) \equiv \sum_i f_G^i(g_i, G) \cdot u'_i(f^i(g_i, G)), \text{ avec } g = \sum g_i. \quad (6.12)$$

La restriction (6.11) implique que l'émission mondiale est toujours égale à la somme des émissions nationales, quels que soient la pollution et son prix implicite⁶. La condition (6.12) pose que le dommage marginal mondial égale la somme des dommages marginaux nationaux en toutes circonstances, i.e. quelles que soient la pollution et les émissions nationales.

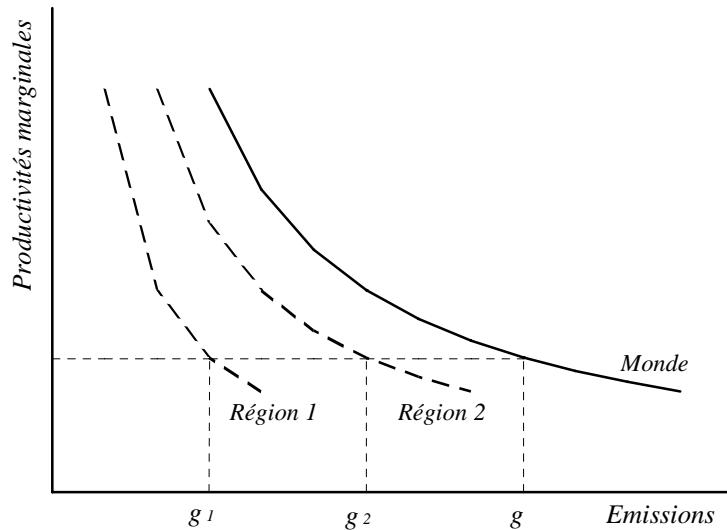
Dans le graphique 6.1, nous représentons les demandes d'émission dans un monde coupé en deux régions. La fonction de demande agrégée additionne horizontalement les demandes régionales. Ainsi, pour un prix donné du facteur, l'égalisation des productivités marginales à ce prix dans les régions 1 et 2 explique une demande égale à g_1 et g_2 respectivement ;

⁶ - La condition (6.11) est équivalente à l'implication suivante :

$$f_{g_i}^i(g_i, G) \cdot u'_i(f^i(g_i, G)) = p, \forall i \Rightarrow f_g(g, G) \cdot u'(f(g, G)) = p, \text{ avec } g = \sum g_i.$$

l'égalisation de la productivité marginale agrégée à ce même prix implique une demande mondiale égale à $g = g_1 + g_2$.

Graphique 6.1 : Agrégation des demandes d'émission



Prouvons maintenant que la trajectoire du jeu différentiel coopératif calquée sur la solution du problème n°1 est optimale lorsque les conditions (6.11) et (6.12) sont satisfaites par les fonctions agrégées. Commençons par supposer que l'émission mondiale coopérative suit la même trajectoire que l'émission optimale du problème n°1, i.e. $\sum g_i(t) = g^*(t)$, quelle que soit t , sans nous intéresser à sa répartition régionale. Le stock de gaz à effet de serre suit alors la même progression dans les deux modèles. Du fait de (6.12), il s'ensuit que le dommage marginal mondial est identique à chaque instant. En appliquant les relations (1.8) et (6.9), on prouve alors que le prix implicite de la pollution suit le même sentier dans les deux modèles. Dès lors, en vertu de (6.11), les émissions régionales sont telles que $\sum g_i^*(t) = g^*(t)$. Ceci démontre que la solution du problème n°1 est une trajectoire faisable du présent modèle. Il reste à remarquer que cette trajectoire converge vers un équilibre stationnaire vérifiant la condition de transversalité (6.6) pour prouver qu'elle est une solution du présent problème.

Donc, si l'on accepte les restrictions (6.11) et (6.12), la solution du problème n°1 décrit la politique coopérative du climat. Malheureusement, la condition (6.12) paraît assez forte. Par contre, elle s'appliquera à coup sûr dans les modèles spécifiant que les dommages marginaux dépendent de la pollution uniquement, i.e. lorsque $\partial[u_i(f^i(g_i, G))]^2 / \partial G \partial g_i = 0$. Ainsi, compte tenu de cette limite, nous consacrerons la section prochaine à la description de la solution coopérative dans le cas où les pays sont identiques.

6.1.2.3 - Dynamique optimale du climat dans le jeu coopératif

Analysons le cas de N pays identiques :

- la fonction de production individuelle est $f(g, G)$;
- l'utilité individuelle est $u(C)$.

Dans ce cas, les relations (6.1a) et (6.5) s'écrivent :

$$\dot{G} = N \cdot g(G, p) - \beta \cdot G, \quad (6.13)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + N \cdot f_G(g(G, p), G) \cdot u'(f(g(G, p), G)), \quad (6.14)$$

où $g(G, p)$ est la demande d'émission individuelle.

Les ensembles $\mathbf{P} = \{(G, p) / \dot{p} = 0; p \geq 0, G \geq 0\}$ et $\mathbf{G} = \{(G, p) / \dot{G} = 0; p \geq 0, G \geq 0\}$ vérifient le lemme 1.2. En supposant que le point $(G_\infty^*, p_\infty^*) \in \mathbf{P} \cap \mathbf{G}$ existe, on peut donc construire le diagramme des phases associé au jeu coopératif. Les propriétés de l'équilibre stationnaire sont données par les relations suivantes :

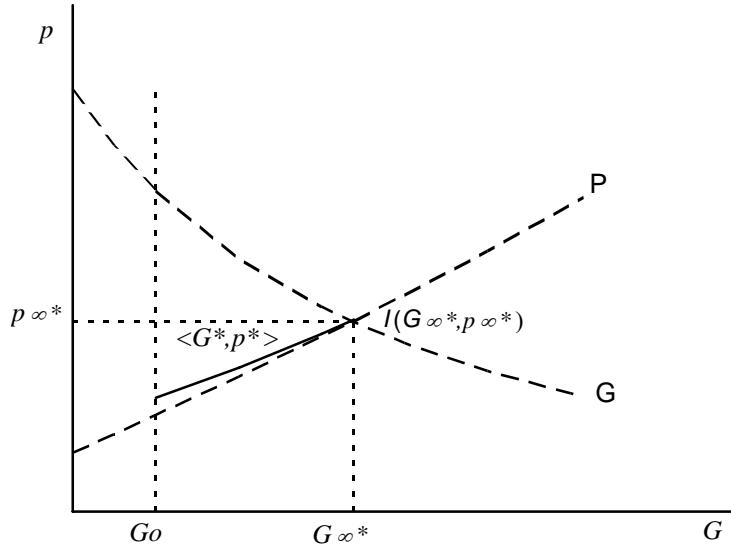
$$\dot{G}(\infty) = 0 \Leftrightarrow N \cdot g(G_\infty^*, p_\infty^*) = \beta \cdot G_\infty^*, \quad (6.15)$$

$$\dot{p}(\infty) = 0 \Leftrightarrow p_\infty^* = -\frac{N \cdot f_G(g(G_\infty^*, p_\infty^*), G_\infty^*) \cdot u'(f(g(G_\infty^*, p_\infty^*), G_\infty^*))}{\delta + \beta}. \quad (6.16)$$

La solution coopérative du jeu différentiel possède les mêmes propriétés que la trajectoire optimale du problème n°1. Elle conduit l'économie de l'état initial à l'état stationnaire. On

vérifie que cette solution est optimale en confirmant qu'elle respecte la condition de transversalité (6.6). Les propositions (1.3), (1.4) et (1.5) s'appliquent.

Graphique 6.2 : Solution coopérative



La seule différence qualitative avec la solution du problème n°1 provient de la signification de ce sentier. Il représente l'évolution de l'économie résultant de l'action combinée de N pays. La répartition des émissions entre ceux-ci est telle que l'utilité marginale de l'input est uniforme. La raison de cette distribution est la recherche de l'efficience économique. Si tel n'était pas le cas, il serait toujours possible d'accroître le bien-être global en diminuant les émissions dans les régions où leur utilité marginale est faible, pour les augmenter ailleurs, et ce jusqu'à l'égalisation en tout lieu.

6.1.3 - Stratégies non coopératives

Si un pays agit en fonction de son propre intérêt, il est conscient des effets transfrontières de son émission mais ne s'en préoccupe pas. Son comportement est dit non coopératif. Il va alors chercher à maximiser son bien-être intertemporel en tenant compte des stratégies adoptées par ses partenaires :

$$\max_{g_i(t)} v_i(G_0, g_i, g_{-i}). \quad (6.17)$$

Si les décisions individuelles sont simultanées, la résolution du jeu utilise le concept d'équilibre de Nash : les stratégies des autres sont considérées données. L'équilibre de Nash du joueur i se définit alors comme sa meilleure réponse \bar{g}_i aux stratégies de Nash \bar{g}_{-i} de ses partenaires :

$$\bar{g}_i(t) / v_i(G_0, \bar{g}_i(t), \bar{g}_{-i}(t)) \geq v_i(G_0, g_i(t), \bar{g}_{-i}(t)), \forall g_i(t) \geq 0. \quad (6.18)$$

6.1.3.1 - Structure d'information en boucle ouverte

Dans l'hypothèse d'une structure d'information en boucle ouverte, chaque pays connaît uniquement la pollution à l'origine. Il anticipe les stratégies optimales $\bar{g}_{-i}(t) = \bar{A}_i(G_0, t)$ de ses partenaires et l'évolution correspondante de la pollution. Ces informations l'aident ensuite à établir son propre programme. Formellement, nous résolvons ce problème en utilisant le Hamiltonien courant associé au programme du joueur i :

$$\tilde{H}_i(G, g_i, p_i, t) = u_i(f^i(g_i, G)) - p_i \left[g_i + \sum_{j=-i} \bar{A}_j(G_0, t) - \beta \cdot G \right]. \quad (6.19)$$

Soit $\langle \bar{g}_i(t), \bar{G}(t) \rangle$ l'équilibre optimal de ce jeu dynamique et $p_i(t)$ la variable adjointe à l'état G . La solution optimale remplit les conditions d'optimalité subséquentes :

$$f_{g_i}^i(\bar{g}_i, \bar{G}) \cdot u'_i(f^i(\bar{g}_i, \bar{G})) = p_i, \quad (6.20)$$

$$\dot{p}_i = (\delta + \beta) \cdot p_i + f_G^i(\bar{g}_i, \bar{G}) \cdot u'_i(f^i(\bar{g}_i, \bar{G})), \quad (6.21)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \cdot \bar{p}_i(t) \cdot \bar{G}(t) = 0. \quad (6.22)$$

La relation (6.20) montre que le pays égalise l'utilité marginale de son émission au prix implicite de la pollution. Sa fonction de demande d'émission reste identique et est donnée par la relation (6.7). Désormais, son évaluation du prix implicite de la pollution ne comptabilise que le dommage ressenti sur son territoire. Il s'obtient en utilisant la relation (6.8). Cette évaluation différente du coût d'usage de l'émission résume toute la différence entre le comportement non coopératif et le comportement coopératif. Alors que, lorsque les pays

coopèrent, chacun met au passif de son émission les nuisances domestiques et étrangères (voir les relations (6.4) et (6.9)), la stratégie non coopérative fait que chaque pays se contente d'internaliser les conséquences nationales de la pollution et fait fi des effets transfrontières.

L'hypothèse d'un monde symétrique, déjà utilisée précédemment, facilite la comparaison des solutions coopérative et non coopérative. Les relations (6.1a) et (6.21) s'écrivent alors :

$$\dot{G} = N \cdot g(G, p) - \beta \cdot G, \quad (6.23)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + f_G(g(G, p), G) \cdot u'(f(g(G, p), G)), \quad (6.24)$$

où $g(G, p)$ est la demande d'émission individuelle.

Appelons \bar{P} le lieu des points où $\dot{p} = 0$: $\bar{P} = \{(G, p) / \dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p + f_G \cdot u' = 0\}$. Il se trouve au-dessous de son homologue du cas coopératif dans le diagramme des phases.

Preuve : en tout point $(G, p) \in \bar{P}$, on a $(\delta + \beta) \cdot p = -f_G \cdot u' < -N \cdot f_G \cdot u'$ si $N > 1$. Puisque $f_G \cdot u'$ décroît avec p , le prix implicite tel que $(\delta + \beta) \cdot p = N \cdot f_G \cdot u'$ est nécessairement supérieur à la valeur de départ, le stock étant fixé.

De plus, on vérifie facilement que le lieu des points G tel que $\dot{G} = 0$ n'est pas modifié en comparant (6.13) et (6.23). Les ensembles \bar{P} et G vérifient le lemme 1.2.

L'équilibre stationnaire non coopératif $(\bar{G}_\infty, \bar{p}_\infty) \in \bar{P} \cap G$, s'il existe, est tel que :

$$\dot{G}(\infty) = 0 \Leftrightarrow N \cdot g(\bar{G}_\infty, \bar{p}_\infty) = \beta \cdot \bar{G}_\infty, \quad (6.25)$$

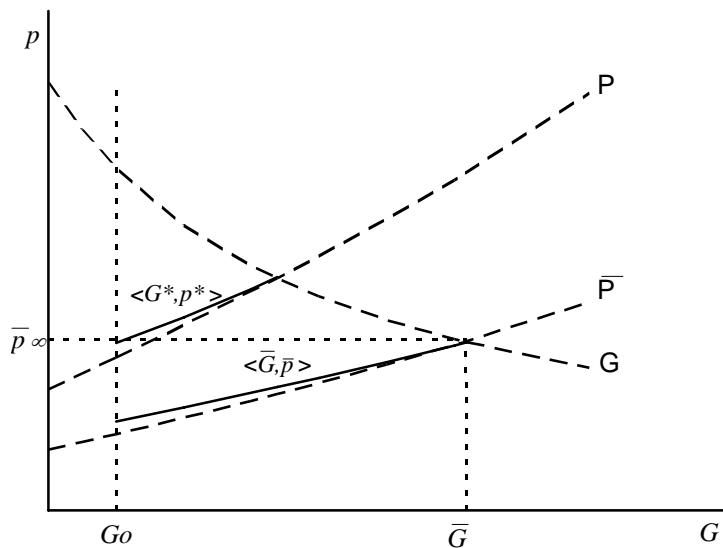
$$\dot{p}(\infty) = 0 \Leftrightarrow \bar{p}_\infty = -\frac{f_G(g(\bar{G}_\infty, \bar{p}_\infty), \bar{G}_\infty) \cdot u'(f(g(\bar{G}_\infty, \bar{p}_\infty), \bar{G}_\infty))}{\delta + \beta}. \quad (6.26)$$

Théorème 6.1 (Information en boucle ouverte) : La pollution et l'émission stationnaires du jeu non coopératif sont plus grandes qu'à l'équilibre stationnaire coopératif. Le prix implicite stationnaire du jeu non coopératif est plus petit qu'à l'équilibre stationnaire coopératif.

Preuve : voir l'annexe 6.2

L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus permet de construire le diagramme des phases et de comparer les trajectoires coopérative et non coopérative.

Graphique 6.3 : Trajectoire de Nash en boucle ouverte



6.1.3.2 - Stratégie de Nash et information en boucle fermée

Lorsque les pays observent l'évolution de la pollution en temps réel, ils acquièrent la possibilité d'ajuster leur stratégie instantanément à toute modification de l'état du système. Ce fait complique la procédure de décision, puisque chaque pays doit désormais tenir compte de la réaction immédiate de ses partenaires à la stratégie qu'il adopte. Ce problème se résout en utilisant le Hamiltonien associé au programme du joueur i :

$$\tilde{H}_i(G, g_i, p_i) = u_i(f^i(g_i, G)) - p_i \cdot \left[g_i + \sum_{j=-i} \bar{A}_j(G(t)) - \beta \cdot G \right]. \quad (6.27)$$

Ceci modifie uniquement l'équation différentielle (6.21) :

$$\dot{p}_i = \left(\delta + \beta - \sum_{j=-i} \bar{A}'_j(G) \right) p_i + f_G^i(\hat{g}_i, \hat{G}) u'_i(f^i(\hat{g}_i, \hat{G})). \quad (6.28)$$

La solution s'obtient en trouvant les propriétés de la fonction inconnue $\bar{A}'(G)$. Sauf dans le cas particulier des jeux linéaires-quadratiques, la détermination de cette fonction n'est généralement pas possible (Fudenberg & Tirole, 1991). C'est précisément cette solution que retiennent Van der Ploeg & de Zeeuw (1992) et Cesar (1994). Du fait de la spécification linéaire-quadratique, la stratégie optimale devient une fonction linéaire de la pollution. Grâce à ces hypothèses, ils démontrent que la pollution et l'émission stationnaires sont plus grandes en information en boucle fermée qu'en information en boucle ouverte. Ainsi, si les pays disposent des moyens techniques et économiques pour surveiller l'évolution de l'atmosphère, la pollution devient plus importante.

La possibilité d'observer l'état du système à tout moment est donc une "arme à double tranchant". L'interprétation de l'équation différentielle (6.28) permet de comprendre les motivations économiques sous-jacentes. Lorsqu'un pays i réduit son émission de dg_i unités, la concentration de gaz à effet de serre diminue de $dG = dg_i$ unités. Dans la structure d'information en boucle fermée, les autres pays sont immédiatement informés de cet effort supplémentaire et modifient leur dépollution en conséquence. Chacun augmente son émission de $\bar{A}'_i(G)$ unités, ce qui représente un coût pour le pays initiateur. Comme ce dernier anticipe la réponse des autres, il préfère polluer plus pour éviter ce coût. Ce raisonnement étant tenu par tous les pays, l'information instantanée des joueurs sur l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre incite à polluer plus.

Van der Ploeg & de Zeeuw (1992) suggèrent ainsi d'évaluer les gains de la coopération en la comparant avec la stratégie de Nash en boucle fermée. Leur argument consiste à mettre en garde contre le risque de sous-estimation de ces avantages en comparant avec les résultats de la structure d'information en boucle ouverte.

6.1.4 - Coopération et bien-être

Par définition, la coopération garantit le plus grand bien-être collectif. Sa supériorité par rapport aux stratégies de Nash a deux sources.

En premier lieu, l'allocation optimale d'un facteur de production entre plusieurs producteurs s'obtient quand la productivité marginale de l'intrant est uniforme. Si cette condition n'est pas satisfaite, l'action de transférer le facteur des entreprises où sa productivité est faible vers les autres accroît la production globale, donc le bien-être. Or, avec les stratégies de Nash et à condition que les pays soient différents, la productivité marginale des émissions varie d'un pays à l'autre, car les pays n'ont pas la même évaluation du coût intertemporel de la pollution. À émission égale, il existe donc une autre répartition régionale qui permet d'accroître le bien-être mondial.

En plus de la raison évoquée précédemment, les stratégies de Nash réduisent le bien-être global par rapport à la coopération car la pollution est excessive. Le coût d'usage réel de l'émission de gaz à effet de serre additionne les dommages marginaux futurs encourus dans tous les pays. Or, à l'équilibre de Nash, les pays sous-estiment ce coût puisqu'ils ne prennent en compte que les dommages domestiques. Ils égalisent donc la productivité marginale de leur émission à cette valeur, créant ainsi p_i unités de bien-être, mais génèrent un coût futur plus important, égal au prix implicite coopératif de la pollution p .

6.1.5 - Application numérique

A part quelques adaptations mineures, l'application numérique subséquente utilise la même spécification et le même paramétrage que dans la section 1.3 du premier chapitre. Nous gardons l'hypothèse simplificatrice d'un monde symétrique composé de N pays. La spécification est la suivante :

$$f(g, G) = g^\rho \cdot (1 - a \cdot G^2), \quad (6.29)$$

$$u(C) = \frac{1}{1-\sigma} \cdot \frac{C^{1-\sigma}}{N}. \quad (6.30)$$

Les conditions d'optimalité sont :

$$\frac{\rho}{N} \cdot g^{\rho(1-\sigma)-1} \cdot (1-a \cdot G^2)^{1-\sigma} = p, \quad (6.31)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p - \frac{2 \cdot a \cdot G}{(1-a \cdot G^2)^\sigma} \cdot g^{\rho(1-\sigma)}, \quad (6.32a)$$

$$\dot{p} = (\delta + \beta) \cdot p - \frac{2 \cdot a \cdot G}{(1-a \cdot G^2)^\sigma} \cdot \frac{g^{\rho(1-\sigma)}}{N}. \quad (6.32b)$$

Remarque 6.1 : La relation (6.32a) s'applique lorsque les pays coopèrent. La relation (6.32b) s'utilise lorsque les pays adoptent des mesures unilatérales. La différence entre les deux vient du fait que le dommage marginal coopératif vaut N fois les dommages domestiques.

En transformant la relation (6.31), on détermine la fonction de demande d'intrant :

$$g(G, p) = \left[\frac{N \cdot p}{\rho \cdot (1-a \cdot G^2)^{1-\sigma}} \right]^{\frac{1}{\rho(1-\sigma)-1}}. \quad (6.33)$$

Nous utilisons la propriété (1.14) pour trouver l'équilibre stationnaire du système. On détermine les expressions suivantes pour le stock de pollution stationnaire de la politique coopérative et de la politique de Nash respectivement :

$$G_\infty^* = \left[a \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \beta}{\rho \cdot (\delta + \beta)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (6.34a)$$

$$\bar{G}_\infty = \left[a \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \beta}{N \cdot \rho \cdot (\delta + \beta)} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (6.34b)$$

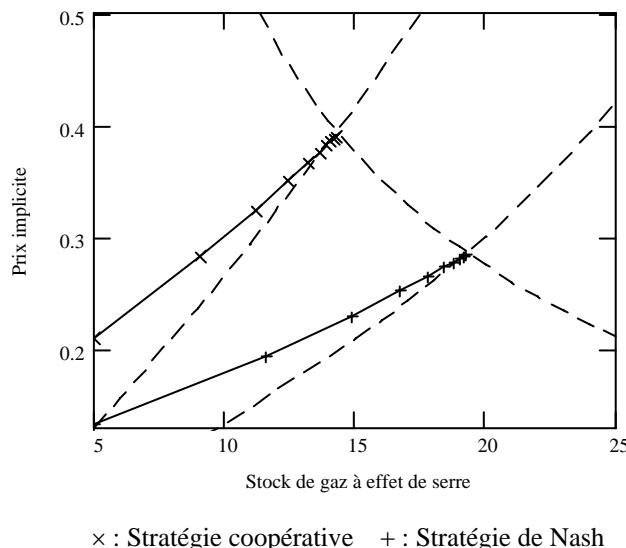
L'expression de la pollution stationnaire coopérative est identique à celle du modèle agrégé (voir la section 1.3) et ne dépend pas du nombre de pays. Par contre, le stock de pollution stationnaire issu de l'équilibre de Nash croît asymptotiquement avec le nombre de pays ; on démontre que $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{G}_\infty = 1/\sqrt{a}$. Cette valeur limite diminue avec les dommages climatiques.

Tableau 6.1 : Pollution stationnaire et nombre de pays

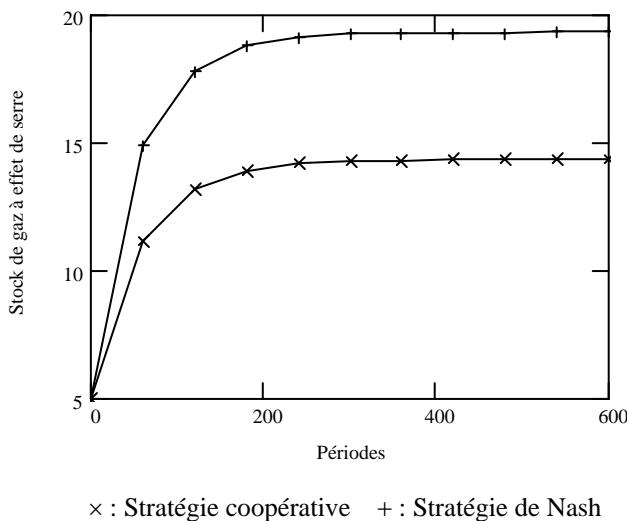
N	Nash	Coopération
1	14,362	14,362
2	19,339	14,362
5	27,021	14,362
10	32,707	14,362
infini	44,721	14,362

Nous étudions maintenant les trajectoires de transition vers l'équilibre stationnaire pour le cas où il y a deux pays et où le stock de gaz à effet de serre d'origine est égal à 5 unités. Le choix d'un plus grand nombre de pays n'a pas d'influence qualitative sur les résultats.

Le graphique 6.4 représente les trajectoires coopérative et non coopérative dans le diagramme des phases. Le stock de gaz à effet de serre et le prix implicite de l'émission augmentent à travers le temps dans les deux cas. Les marques représentées sur les trajectoires sont équidistantes en termes de temps. Le stock de gaz à effet de serre augmente donc beaucoup plus vite lorsque les pays adoptent leur stratégie de Nash.

Graphique 6.4 : Trajectoires optimales coopérative et non coopérative

Le graphique 6.5 indique que la pollution est sensiblement plus élevée lorsque les pays ne coopèrent pas. La différence serait encore accentuée avec un nombre de pays plus grand.

Graphique 6.5 : Stock de gaz à effet de serre et stratégies nationales

6.2 - Résultats des jeux dynamiques appliqués

A notre connaissance, il n'existe que deux études consacrées à la quantification des avantages régionaux de la coopération dans le cadre d'une politique climatique (Nordhaus & Yang, 1996 ; Tahvonen, 1994). Tahvonen construit un jeu différentiel appliqué étalonné sur les résultats du modèle d'équilibre général de Manne (1993) en ce qui concerne la croissance économique, les émissions de dioxyde de carbone et les coûts de leur limitation. De ce fait, il considère 5 régions différentes : les Etats-Unis, le reste de l'O.C.D.E., l'Ex-U.R.S.S., la Chine et le reste du monde. Il suppose que les dommages climatiques croissent linéairement avec l'élévation de la température moyenne.

Le modèle RICE de Nordhaus & Yang (1996) “désagrège” le modèle DICE (Nordhaus, 1992a et 1993) en 10 régions : les Etats-Unis, le Japon, l’Union européenne, l’Ex-U.R.S.S., la Chine et 5 autres régions hétérogènes. En dehors d'un facteur de progrès technique autonome, RICE modélise explicitement la croissance économique, puisque l'accumulation du capital est décrite sous la forme d'un arbitrage intertemporel identique à celui du modèle de Ramsey (1928). Les émissions de gaz à effet de serre sont supposées proportionnelles à la production

globale et les coûts de leur réduction sont calibrés sur les résultats de plusieurs modèles d'équilibre général. Nordhaus & Yang supposent que les dommages sont proportionnels au carré de l'accroissement de la température.

Ces modèles sont conçus pour étudier trois scénarios différents (la politique inchangée, la non-coopération et la coopération) puis pour les comparer entre eux. L'innovation majeure, par rapport aux modèles mondiaux, provient du scénario non coopératif. D'abord, la détermination de cette trajectoire a l'avantage de montrer ce que les pays devraient ou pourraient entreprendre de leur propre initiative pour limiter le réchauffement planétaire. Ensuite, le sentier d'équilibre de Nash semble plus pertinent que la trajectoire de politique inchangée pour apprécier les gains potentiels de la lutte contre l'effet de serre. Enfin, il nous renseigne explicitement sur les éventuels perdants et gagnants de la coopération.

Bien entendu, les résultats doivent être interprétés avec prudence. Nordhaus & Yang (1996, p. 761) soulignent d'eux-mêmes que « ces résultats sont provisoires et susceptibles d'être revus. De plus amples recherches seront nécessaires pour tester leur robustesse... et pour comparer les résultats avec d'autres modèles »⁷.

L'objectif de cette section est précisément d'aller dans le sens indiqué par ces auteurs. Bien sûr, l'échantillon, constitué de deux études seulement, est insuffisant pour dégager des certitudes. Toutefois, l'étude fouillée des nombreux désaccords entre les deux modèles et de leurs causes permettra de valider certains résultats.

6.2.1 - Les déterminants des taxes domestiques

La variable clé des modèles de Nordhaus & Yang et de Tahvonen est la taxe domestique sur les émissions de dioxyde de carbone. Avant de débuter l'étude comparative proposée ci-dessus, mieux vaut se munir d'un outil d'analyse capable d'isoler les

⁷ - « These results are tentative and subject to revision. Further work will be necessary to test their robustness against alternative assumptions ... and to compare the results against different models. »

déterminants de cette variable. La relation (3.4) fournit ce cadre de réflexion. La taxe domestique sur les émissions de dioxyde de carbone s'écrit :

$$\bar{p}_i(t) = \frac{r \cdot \omega \cdot f}{\delta + \beta - n_i} \cdot \frac{a_i}{\delta + r - n_i} \cdot Y_i \cdot e^{n_i \cdot \tau}, \quad (6.35)$$

où

β , f , r et ω sont des paramètres climatologiques,

a_i mesure la sensibilité nationale à l'accroissement de la température (le dommage est égal à $a_i/25$ % du P.I.B. par degré Celsius supplémentaire),

Y_i correspond au P.I.B. du pays,

n_i est le taux de croissance du pays.

La diversité des taxes nationales proviendrait donc des inégalités de développement, des perspectives de croissance économique et de la sensibilité aux changements climatiques. Plus précisément, la taxe non coopérative d'un pays donné est d'autant plus élevée que son P.I.B. est grand, qu'il connaît une forte croissance et qu'il est vulnérable à l'effet de serre.

Les estimations de Nordhaus & Yang confirment ces propriétés. Ils déterminent, en effet, que les taxes domestiques en 2000 ne sont significatives que dans les pays de l'O.C.D.E. Nordhaus et Yang (1996, p. 753) ajoutent qu' « en dehors des Etats-Unis, de l'Europe et du Japon, la stratégie non coopérative rationnelle consisterait simplement à ignorer le réchauffement climatique dans un premier temps. »⁸. Par contre, à mesure que des pays comme la Chine, l'Inde et l'ex-U.R.S.S. se développent, ces régions participent plus activement à la réduction des émissions de carbone (les taxes non coopératives de ces régions sont multipliées par 5 entre 2000 et 2040, pendant qu'elles doublent dans les pays de l'O.C.D.E.).

⁸ - « Outside the United-States, Europe, and Japan, the rational noncooperative strategy would be simply to ignore global warming at the present time. ».

6.2.2 - Politiques unilatérales optimales

Les taxes domestiques non coopératives maximisent le bien-être intertemporel individuel des pays. Ainsi, leur valeur et leur diversité attestent les motivations relatives des pays à lutter contre l'effet de serre. De par leur implication pratique, elles constituent donc une information particulièrement significative.

Malheureusement, les estimations de Tahvonen et de Nordhaus & Yang diffèrent sensiblement. Pour le premier, les taxes non coopératives varient entre 0,8 dollar par tonne de carbone, pour les Etats-Unis, et 7,1 dollars par tonne de carbone, pour la région “reste du monde”, en 2040. Les estimations de Nordhaus & Yang sont nettement inférieures et, ce qui est plus gênant, aboutissent à un classement inverse des pays : en 2040, les pays de l'O.C.D.E. imposent des taxes nationales allant de 0,7 dollar par tonne de carbone, pour le Japon, à 1,5 dollar par tonne de carbone, pour l'Union européenne, alors qu'elles oscillent entre 0,01 et 0,4 dollar par tonne de carbone pour les autres régions du monde (0,4 dollar pour la Chine et l'ex-U.R.S.S.). Un profond désaccord oppose donc les deux études. La première fait des pays en développement les principaux acteurs de la lutte non coopérative contre l'effet de serre. La seconde laisse à penser, au contraire, que ces pays ne feront rien pour l'atténuer de leur propre initiative.

Les discussions subséquentes, se rapportant au paramétrage des modèles et à la méthode d'analyse utilisée, vont atténuer ces désaccords pour déboucher sur un relatif consensus. En dehors des modules climatologiques différents utilisés dans les deux modèles ⁹, deux causes expliquent les différences constatées.

⁹ - Sur ce point, il convient de noter que Tahvonen retient l'hypothèse simplificatrice d'une élévation de la température croissant linéairement avec la concentration en carbone. De ce fait, l'accumulation du gaz carbonique a toujours le même effet sur le climat. En fait, comme le posent Nordhaus & Yang, la relation entre l'accroissement de la température et la concentration atmosphérique est logarithmique, si bien que l'effet sur le climat décroît à mesure que la pollution augmente. La modélisation du système climatique par Tahvonen conduit donc à surestimer les taxes par rapport à RICE. Par contre, cette différence est sans effet sur le classement des pays en fonction des taxes domestiques qu'ils appliquent.

Le calibrage des paramètres de sensibilité régionale au réchauffement diffère notablement entre les deux modèles (voir le paramètre a dans le tableau 6.2). Pour Tahvonen, les Etats-Unis souffrent très peu de l'effet de serre, les pays en développement sont très vulnérables et l'ex-U.R.S.S. a une position intermédiaire. Pour Nordhaus & Yang, l'ex-U.R.S.S. est la région la plus épargnée, le “reste du monde” perd le plus et les autres régions oscillent entre ces deux extrêmes. D'une manière générale, Tahvonen suppose des pertes plus importantes.

Le tableau 6.2 permet d'apprécier l'influence du calibrage de ces paramètres sur les taxes domestiques. Nous l'avons construit en appliquant la relation (6.35) et les prévisions macro-économiques de l'E.M.F. n°12 (qui servent aussi d'étalonnage aux deux modèles étudiés). L'utilisation des paramètres de Nordhaus & Yang, plutôt que ceux de Tahvonen, conduit à déterminer des taxes régionales plus importantes pour les pays de l'O.C.D.E. et plus faibles pour les régions en développement. Ce test de sensibilité prouve donc que les différences entre les deux modèles viennent, en partie, du calibrage des fonctions de dommage.

Tableau 6.2 : Influence des dommages régionaux sur les taxes unilatérales (en 2000)

Région	PIB 1990 (milliards de \$)	Taux de croissance 1990-2100	Nordhaus		Tahvonen	
			a	Taxe (\$/tC)	a	Taxe (\$/tC)
Etats-Unis	5600	1,53%	1,10%	1,79	0,70%	0,95
OCDE (hors E-U)	10200	1,55%	1,17%	3,50	1,00%	2,49
Ex-URSS	2680	2,46%	0,86%	1,16	1,50%	1,69
Chine	1100	3,53%	1,52%	2,05	3,00%	3,36
Reste du monde	3340	2,83%	2,09%	4,60	3,00%	5,49

Notes :

Le taux de croissance moyen sur la période 1990-2100 est prolongé infiniment ;

Le paramètre a donne le dommage climatique, en pourcentage du P.I.B., d'un doublement de la concentration en carbone.

Sources :

E.M.F. n°12 pour les données macro-économiques ;

Les constantes climatologiques de la relation (6.35) sont présentées dans l'encadré 1 du chapitre préliminaire.

Malgré l'harmonisation des paramètres de sensibilité climatique, la taxe non coopérative appliquée par la région “reste du monde” reste la plus élevée dans tous les cas, ce qui contredit la proposition de Nordhaus & Yang. En fait, de même que Tahvonen, les calculs du tableau 6.2 supposent, implicitement, que cette région forme une unité de décision solidaire.

Ceci n'est pas approprié si l'on veut prévoir les mesures qu'entreprendraient ces pays de leur propre initiative. Nordhaus & Yang considèrent pour leur part, ce qui plus approprié, que cette région se constitue de 189 pays décident leur politique isolément. Pour corriger cette erreur, en supposant que les pays de cette région sont identiques, il convient donc de diviser la taxe régionale du tableau 6.2 par le nombre de pays, afin d'obtenir les taxes nationales de la région “reste du monde”. On trouve alors, de même que Nordhaus & Yang, une taxe négligeable (de l'ordre 0,03 dollar par tonne).

Remarque 6.2 : Le même problème se pose pour l'O.C.D.E. (hors Etats-Unis). Tahvonen traite ce groupe comme s'il formait un seul pays et obtient, de ce fait, une taxe trop grande. Nordhaus & Yang découpent cette région en trois ensembles : l'Union européenne, supposée agir dans l'intérêt agrégé des pays membres ; le Japon ; les autres pays sont intégrés dans la région “reste du monde” et décident leur politique nationale de façon indépendante. Compte tenu des parts respectives dans les dommages ressentis individuellement, la taxe de l'O.C.D.E. (hors Etats-Unis) du tableau 6.2 se décompose, grossièrement, en deux tiers pour l'Europe et un tiers pour le Japon.

Le cumul de deux causes de divergence entre les résultats des deux modèles confirme le classement des régions de Nordhaus & Yang en fonction des taxes non coopératives appliquées : par ordre décroissant, l'O.C.D.E. (hors Etats-Unis), les Etats-Unis, la Chine, l'ex-U.R.S.S. et le “reste du monde”, vu comme N pays indépendants. Sachant, de plus, que la relation (6.35), qui nous a servi à faire ces tests, est semblable à celle qu'utilise Tahvonen, on conclut que les deux modèles donneraient des résultats comparables, à condition d'harmoniser les fonctions de dommage et la méthode.

6.2.3 - Comparaison des politiques unilatérales à la politique coopérative

Le modèle RICE détermine une taxe coopérative allant de 6 à 27 dollars par tonne de carbone entre 2000 et 2100. Cette estimation est très proche des valeurs obtenues avec les modèles mondiaux (Nordhaus, 1992b et 1993 ; Peck & Teisberg, 1992). Tahvonen ne fournit aucune information sur ce point.

Les émissions de dioxyde de carbone de la trajectoire coopérative sont sensiblement plus faibles que les émissions non coopératives. Tahvonen prévoit un taux de dépollution non coopératif de seulement 2,5 pour-cent en 2040 par rapport à la trajectoire de référence, contre plus de 6 pour-cent dans le cas coopératif. Le modèle RICE détermine une baisse des émissions en 2000 de 2,3 pour-cent lorsque les pays appliquent des politiques unilatérales et de 9,7 pour-cent dans l'hypothèse d'un accord optimal sur le climat.

La comparaison des efforts de dépollution régionaux montre, à nouveau, des différences importantes entre les deux modèles (voir le tableau 6.3). Les estimations de Nordhaus & Yang prévoient que les pays non-membres de l'O.C.D.E. assumeront la plus grande partie des efforts de réduction des émissions de carbone si une politique coopérative voit le jour. En effet, puisque tous les pays appliquent la même taxe, ceux qui peuvent dépolluer à moindre coût, i.e. les pays en développement et l'ex-U.R.S.S., consentent un effort plus grand. Tahvonen obtient un résultat qualitativement comparable sur la première moitié du XXI^e siècle, mais ses estimations divergent totalement ensuite. Cette proposition semble peu crédible. Elle découle des fonctions de coût de réduction des émissions utilisées, qui intègrent de manière exogène des ajustements économiques décrits par le modèle d'équilibre général de Manne (1993).

Tableau 6.3 : Taux de dépollution régionaux par rapport au scénario de référence (politique optimale)

	Date	Etats-Unis	OCDE (hors E-U)	Ex-URSS	Chine	Reste du monde
Nordhaus & Yang	2030	11%	9%	15%	19%	12%
	2090	15%	13%	17%	20%	15%
Tahvonen	2030	4%	2%	7%	7%	11%
	2090	95%	95%	20%	0%	0%

Sources : Nordhaus & Yang (1996) et Tahvonen (1994).

La conclusion de cette synthèse consiste logiquement à découvrir les gains régionaux de la coopération par rapport aux stratégies individuelles estimés par les deux modèles. Ces informations, proposées dans le tableau 6.4, classent les pays selon l'intérêt qu'ils trouvent à coopérer.

Tableau 6.4 : Gains coopératifs par rapport à Nash (en milliards de \$, valeur présente)

	Etats-Unis	OCDE (hors E-U)	Ex-URSS	Chine	Reste du monde	Monde
Nordhaus & Yang	-2,1	63,3	1,4	30,7	208,3	301,6
Tahvonen	-100	20	-13	82	45	34

(a) : le découpage régional par Nordhaus & Yang diffère légèrement de celui utilisé habituellement dans la littérature : l'OCDE (hors Etats-Unis) = CEE et Japon ; le “reste du monde” intègre donc les membres suivants de l'OCDE : l'Australie, le Canada, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, la Suisse et la Turquie.

Les simulations de Tahvonen déterminent un avantage mondial de la coopération plus faible. Là encore, le traitement de la région “reste du monde”, en tant qu'entité solidaire, déforme nécessairement les résultats. Les simulations de Tahvonen reviennent à considérer que les pays de cette région coopèrent entre eux, même dans le cas de la politique non coopérative. Il s'ensuit qu'elles surévaluent les gains du scénario non coopératif par rapport à la situation de politique inchangée : 111 milliards de dollars contre 42,5 milliards de dollars pour Nordhaus & Yang. L'équilibre de Nash sert ensuite d'échelle de mesure pour évaluer les gains de la coopération, qui capte seulement le complément des gains de la coopération.

Les Etats-Unis et l'ex-U.R.S.S. seraient les perdants de la coopération. Deux caractéristiques communes à ces deux pays expliquent ce résultat. D'abord, ils sont relativement peu sensibles aux changements climatiques. En coopérant, ils accepteraient donc de se préoccuper des dommages extérieurs mais tireraient un profit relativement faible des mesures engagées. De plus, l'ex-U.R.S.S. (les Etats-Unis dans une moindre mesure) peut réduire son émission de carbone à un coût marginal faible. Cette facilité relative à dépolluer lui impute une part assez importante de l'effort global de limitation des émissions.

Le “reste du monde”, la Chine et l'O.C.D.E. (hors Etats-Unis) gagnent à coopérer pour des raisons variées. Les deux premières régions seraient assez vulnérables aux changements climatiques. Ainsi, bien qu'elles supportent une grosse partie de la dépollution globale, les dommages évités grâce à la coopération mondiale leur garantissent un gain net substantiel. De son côté, l'O.C.D.E. (hors Etats-Unis) gagne relativement peu car elle n'endure pas de dommages très importants mais investit également peu dans la lutte contre l'effet de serre, car toute baisse des émissions de carbone dans cette région est obtenue à un coût marginal élevé.

6.3 - Dilemme du prisonnier et stratégies punitives

La coopération s'imposera à condition que les incitations à resquiller soit éliminées. A tout moment, les pays sont tentés d'augmenter leurs émissions de gaz à effet de serre pour profiter des efforts étrangers, sans supporter les coûts de la stratégie commune. A moins qu'un système efficace de sanctions ou d'incitations ne soit inventé, le problème du dilemme du prisonnier s'applique au jeu mondial de l'effet de serre et complique sérieusement la marche vers la coopération. Ce paradoxe classique en économie publique se comprend mieux à l'aide de l'exemple suivant.

Jeu 8.1 : Jeu à un coup avec information complète et connaissance commune

		Pays 1	
		NC	C
Pays 2	NC	(0;0)	(-1;4)
	C	(4;-1)	(2;2)

Notes :

C = coopération NC = non-coopération

Lire (Gain du pays 1 ; Gain du pays 2)

L'analyse du jeu 8.1 montre que :

- si le pays 1 décide de coopérer, il s'expose à une perte égale à -1, car l'autre pays a intérêt choisir sa stratégie non coopérative ;
- par contre, s'il choisit d'emblée sa stratégie de Nash, il s'assure un gain nul, supérieur au précédent.

Le raisonnement rationnel des joueurs les conduit donc à préférer leur stratégie non coopérative. Même si les joueurs s'entendent, sachant qu'ils sont conscients de leur intérêt commun, ils savent également qu'il est dans l'intérêt de l'autre de tricher au dernier moment.

Le résultat tiré de l'analyse de l'exemple 8.1 est sans appel. La coopération entre des dirigeants rationnels est impensable. Pourtant, l'observation des pratiques internationales contredit régulièrement cette conclusion. On en vient à penser que ce jeu ne représente pas

convenablement les relations entre les Etats. Par exemple, l'impossibilité de se proférer des menaces mutuelles (aussi bien des sanctions que des récompenses), pratique pourtant courante dans la vie diplomatique mondiale, prouve que l'exemple 8.1 n'est pas approprié. En fait, le jeu 8.1 est atemporel, puisqu'il n'est précédé d'aucune histoire et puisque son résultat est sans effet sur l'avenir. Ce défaut doit être corrigé, d'autant plus dans le cas d'une politique mondiale du climat, où il s'agit de prendre une séquence infinie de décisions. De plus, si le jeu est répété plusieurs fois, des mesures de rétorsions deviennent possibles¹⁰.

Jeu 8.2 : Super-jeu constitué de la répétition infinie du jeu 8.1

Le jeu 8.2 offre la possibilité de définir des stratégies plus élaborées si les pays peuvent informer leurs partenaires sur leurs intentions. La stratégie du Talion est un exemple classique de stratégie basée sur la menace. Elle consiste à annoncer que l'on choisit de coopérer tant que les autres coopèrent et que l'on cesse de le faire dès qu'un joueur fait cavalier seul et ce, tant qu'il ne revient pas sur cette décision.

Ainsi, supposons que les pays aient adopté cette stratégie et que la coopération se soit maintenue jusqu'à une date donnée. A cette étape du jeu, un pays peut décider soit de continuer à coopérer, soit de faire cavalier seul pendant T tours, avant de revenir. Dans la première hypothèse, il gagne $2/\delta$ (en supposant que la coopération perdure indéfiniment).

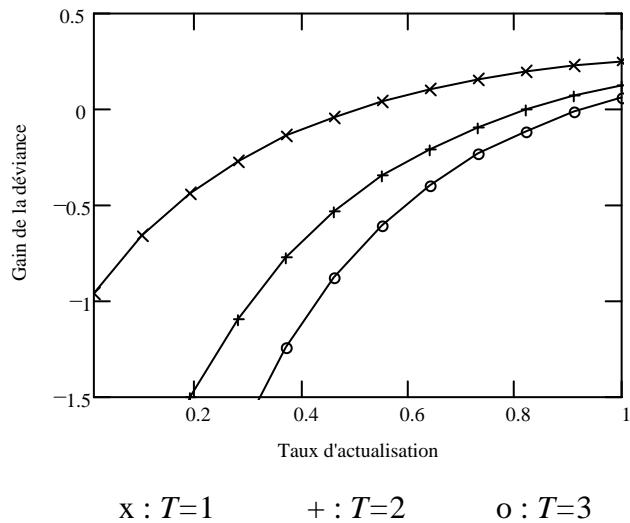
Dans l'autre cas, il gagne $4.(1+\delta)^{-1} + 0.\sum_{t=2}^T (1+\delta)^{-t} - 1.(1+\delta)^{-(T+1)} + 2.\sum_{t=T+2}^{\infty} (1+\delta)^{-t}$. Le

premier terme correspond au gain provisoire du resquillage. Pendant les périodes suivantes, la stratégie de Nash n'est plus payante car les autres pays sanctionnent cette action en adoptant eux aussi cette stratégie. Cette situation cesse lorsque le pays coopère à nouveau et l'équilibre coopératif s'installe en deux temps : le pays responsable de cette séquence prend l'initiative (troisième terme) ; les autres le constatent et adoptent leur stratégie coopérative (dernier terme).

¹⁰ - La théorie des jeux propose d'autres moyens pour résoudre le dilemme du prisonnier qui ne seront pas abordés ici : voir Barrett (1990) et Blackhurst & Subramanian (1992).

Théorème 6.2 : Lorsque les pays adoptent explicitement la stratégie du Talion, la coopération, une fois en place, se maintient indéfiniment si le facteur d'actualisation n'est pas trop grand. En effet, à cette condition, la déviation de la coopération n'est jamais payante.

Preuve : Considérons une “déviance” d'une durée de 1 tour. Le pays fautif en tire un gain $4.(1+\delta)^{-1} - 1.(1+\delta)^{-2} + 2/\delta.(1+\delta)^{-2}$, qui doit être comparé au gain $2/\delta$ qu'il obtiendrait s'il avait sagement continué à coopérer. On démontre facilement que le premier est supérieur au second, à condition que le facteur d'actualisation soit supérieur à $1/2$. Le graphique ci-dessous généralise ce résultat pour d'autres cas.



Quand le jeu est répété un nombre infini de fois, l'adoption collective d'une stratégie de rétorsion comme la précédente engendre donc une coopération implicite entre les joueurs. L'issue coopérative est préférée sur des critères strictement individuels, i.e. non coopératifs. Ceci découle directement du Folk Theorem. En outre, la tactique “donnant, donnant” constitue un système de menaces crédible. En effet, lorsqu'un joueur met en oeuvre la sanction prévue, il se contente de suivre ce que lui dicte son intérêt, si bien que l'autre n'a aucune chance d'y échapper. On dit que la stratégie “donnant, donnant” est un équilibre parfait en sous-jeu.

Cesar (1994) adapte le raisonnement du Folk Theorem pour l'appliquer au jeu différentiel de l'effet de serre. La différence essentielle, par rapport aux jeux 8.1 et 8.2, est que la matrice des gains évolue en fonction de l'histoire du jeu, puisque les décisions passées agissent sur le stock de gaz à effet de serre atmosphérique présent. Cesar analyse deux stratégies punitives différentes.

Dans le premier cas, les pays lésés par un resquilleur menacent d'adopter leur stratégie de Nash pour toutes les périodes qui suivent. Cesar montre qu'une telle punition dissuade toute tricherie et maintient indéfiniment l'équilibre coopératif. Seulement, cette menace n'est pas crédible car elle lèse autant les sanctionneurs que le sanctionné. La stratégie punitive est donc renégociable et le resquilleur peut espérer, à juste titre, ne pas la subir s'il propose de revenir rapidement à la coopération. L'issue coopérative ne peut donc pas être maintenue par un tel système de sanctions.

Cesar tente alors d'adapter la stratégie du Talion au jeu différentiel. Il ne parvient pas à proposer une démonstration analytique de la non-négociabilité de cette stratégie mais le prouve à l'aide d'une application numérique. Une fois en place, l'équilibre coopératif du jeu différentiel de l'effet de serre pourrait donc se maintenir indéfiniment si les pays appliquent des mesures de rétorsion appropriées à l'encontre des tricheurs potentiels.

En théorie, la stratégie du Talion possède ainsi de nombreuses qualités, dont la principale est de soutenir la coopération. Dans la pratique, Dixit & Nalebuff (1991) notent qu'elle comporte des risques si la frontière entre la coopération et la non-coopération est floue et soumise aux interprétations des joueurs. Ainsi, dans le jeu de l'effet de serre, si un pays sélectionne un niveau de dépollution qu'il estime coopératif mais que son partenaire “diagnostique”, par erreur, un acte non coopératif, le dernier infligera une sanction au premier. De bonne fois, le pays floué analysera à son tour cette action comme une déviance et répondra par sa stratégie de Nash. Le jeu rentre alors dans un cercle vicieux. Pour parer une telle escalade, Dixit & Nalebuff redéfinissent la stratégie “donnant, donnant” en limitant l'aléa lié à l'appréciation des joueurs : la sanction ne s'applique que lorsque le nombre d'écart par rapport à la coopération dépassent une proportion donnée au cours des tours

passés du jeu. Cette condition supprime les erreurs d'interprétation tout en préservant l'esprit de la stratégie du Talion.

6.4 - Conclusion

La construction du jeu différentiel de l'effet de serre rend compte des choix stratégiques nationaux dans l'élaboration d'une politique mondiale du climat. Le comportement coopératif est celui où les pays agissent de concert afin d'assurer le plus grand bien-être collectif à tous les participants. La trajectoire correspondante coïncide avec la politique climatique mondiale, telle que nous la décrivons dans la première partie de cette thèse.

Comme les pays anticipent les tentations de leurs partenaires, qui les poussent à laisser les étrangers agir contre l'effet de serre sans rien tenter d'exagérer, l'issue coopérative est, a priori, peu probable. Ainsi, les pays adoptent plus naturellement une stratégie non coopérative de Nash. Si tel est le cas, l'émission mondiale de gaz à effet de serre est plus importante, comparée à l'issue coopérative, en raison du fait que chaque pays internalise seulement la partie des dommages climatiques mondiaux qu'il subit sur son territoire.

Cet écart par rapport à l'optimum social dépend de la faculté des joueurs à observer l'état du système climatique : il est plus important en information en boucle fermée, soit quand les pays observent instantanément la pollution, qu'en boucle ouverte, soit lorsqu'ils connaissent seulement l'état du climat à l'origine du jeu. En fait, l'information en boucle fermée, situation certainement plus représentative de la réalité, annihile les velléités de dépollution, car tout effort unilatérale supplémentaire est partiellement compensé par un laxisme plus grand à l'étranger, motivé par l'observation de l'évolution résultante du système climatique.

Les modèles appliqués, au nombre de deux seulement, fournissent des évaluations incompatibles, ce qui invite à la prudence quant à leur exploitation. Nous atténuons toutefois cette impression en montrant que les désaccords résultent principalement du calibrage des dommages et d'une erreur méthodologique dans la résolution de l'un d'entre eux. En retenant l'étude la plus crédible, on en vient à énoncer les résultats suivants :

- les politiques domestiques non coopératives sont très insuffisantes, au regard de l'optimum social. Par exemple, en 2000, elles impliqueraient de taxer les émissions de carbone de

0,27 dollars par tonne en moyenne seulement, contre environ 6 dollars par tonne dans le cas coopératif ;

- à court terme, seuls les grands pays industrialisés trouveraient justifier d'agir pour ralentir l'accroissement de l'effet de serre. A l'inverse, les autres pays anticipent un gain individuel de la lutte contre l'effet de serre trop faible pour justifier des mesures de dépollution coûteuses ¹¹.

La préférence des joueurs pour la non-coopération n'est pas inéluctable. En effet, la définition de stratégie de rétorsion punissant les déviants, comme par exemple la menace "donnant, donnant", peut maintenir l'équilibre coopératif indéfiniment. Ce résultat classique en théorie des jeux répétés, quoique rassurant, n'a aucune utilité pratique. S'il prouve la persistance possible de l'issue coopérative, il n'explique pas la transition entre les deux situations.

Le septième et le huitième chapitres tentent d'éclaircir cette question. Le chapitre 7 fait d'abord le bilan sur l'état actuel des négociations internationales, en prenant soin de mettre en évidence les sources de blocages. En nous appuyant sur un jeu statique calibré, nous recherchons ensuite les raisons économiques ralentissant les progrès des négociations, que nous imputons principalement à une trop grande rigidité de la Convention-cadre sur les changements climatiques. Dans le chapitre 8, nous passons à une réflexion plus théorique, dont le nœud est le concept de coalition auto-réalisatrice. Nous identifions les pays signataires type pour différentes hypothèses sur les règles de fonctionnement des coalitions.

¹¹ - Ce résultat est conforme aux engagements souscrits dans la Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992).

Annexe 6.1 : Démonstration de la propriété 6.1

En résolvant l'équation différentielle (6.5), on démontre que :

$$p(t) = - \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \left[\sum_{i=1}^N \bar{\omega}_i \cdot f_G^i(g_i, G) \cdot u'_i(f^i(g_i, G)) \right] d\tau,$$

$$p(t) = - \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot \bar{\omega}_1 \cdot f_G^1 \cdot u'_1 d\tau - \dots - \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot \bar{\omega}_N \cdot f_G^N \cdot u'_N d\tau,$$

et, si les coefficients de négociation sont constants,

$$p(t) = \sum_{i=1}^N \bar{\omega}_i \left[- \int_t^\infty e^{-(\delta+\beta)(\tau-t)} \cdot f_G^i(g_i, G) \cdot u'_i(f^i(g_i, G)) d\tau \right]$$

Ceci démontre le résultat recherché.

Annexe 6.2 : Démonstration du théorème 6.1

Commençons par définir les deux fonctions suivantes :

$$A(G) = f_g(\beta \cdot G/N, G) \geq 0,$$

$$B(G) = -f_G(\beta \cdot G/N, G) / (\delta + \beta) \geq 0.$$

En utilisant les relations (6.4), (6.15) et (6.16), d'une part, et (6.20), (6.25) et (6.26), d'autre part, on vérifie que :

- le point stationnaire coopératif est tel que $A(G_\infty^*) = N \cdot B(G_\infty^*)$.
- le point stationnaire non coopératif est tel que $A(\bar{G}_\infty) = B(\bar{G}_\infty)$.

La suite de la démonstration nécessite les relations suivantes :

$$A'(G) = \left[\frac{\beta}{N} \cdot f_{gg} + f_{gG} \right] \leq 0,$$

$$B'(G) = -\frac{1}{\delta + \beta} \left[\frac{\beta}{N} \cdot f_{Gg} + f_{GG} \right] \geq 0.$$

Compte tenu des propriétés des fonctions $A(G)$ et $B(G)$, quelle que soit $G \geq \bar{G}_\infty$, on a $A(G) \leq A(\bar{G}_\infty)$ et $B(G) \geq B(\bar{G}_\infty)$. On peut donc établir la relation d'ordre suivante :

$$\forall G \geq \bar{G}_\infty, A(G) \leq A(\bar{G}_\infty) = B(\bar{G}_\infty) \leq B(G).$$

De plus, si $N > 1$, $N \cdot B(G) > B(G)$ pour tout G . En associant ce résultat à la relation précédente, on montre finalement que :

$$\forall G \geq \bar{G}_\infty, A(G) < N \cdot B(G).$$

Ceci implique que, si l'équilibre stationnaire coopératif G_∞^* existe, il sera nécessairement strictement plus petit que l'équilibre stationnaire non coopératif \bar{G}_∞ , puisque G_∞^* est tel que $A(G_\infty^*) = N \cdot B(G_\infty^*)$.

Il s'ensuit que :

- l'émission stationnaire non-coopérative est plus grande que l'émission stationnaire coopérative, puisque $\bar{g}_\infty = \beta \cdot \bar{G}_\infty / N > g_\infty^* = \beta \cdot G_\infty^* / N$;
- le prix implicite stationnaire non-coopératif est supérieur au prix implicite stationnaire coopératif, puisque $\bar{p}_\infty = B(\bar{G}_\infty) < p_\infty^* = N \cdot B(G_\infty^*)$.

Chapitre 7

Négociations internationales

A ce jour, l’O.N.U. et quelques autres O.N.G. ont organisé de très nombreuses rencontres internationales portant, spécifiquement ou non, sur les changements climatiques ; les dernières en date sont les conférences de Rio de Janeiro en 1992, de Berlin en 1995 et de New York en 1997. Des accords de principe en sont ressortis, sans qu’ils soient assortis d’engagements quantifiés et contraignants. Les discussions reprendront à Kyoto, en décembre 1997, et pourraient aboutir à des résultats plus probants, le Président Clinton ayant affirmé qu’il s’y rendrait avec « un engagement américain “réaliste, sur des limites contraignantes afin de réduire sensiblement les émissions de gaz à effet de serre” » (Le Monde, 28 juin 1997) ¹.

Cette succession de conférences internationales prouve la bonne volonté de la communauté internationale dans son ensemble. Par contre, la lenteur des négociations témoigne de l’ampleur des difficultés à surmonter avant tout règlement définitif ². Les pays industrialisés sont historiquement responsables de la situation présente mais ne pourront pas régler seuls le problème, vu la croissance rapide des rejets de gaz à effet de serre par les pays en développement ; il faudrait donc, à terme, obtenir leur participation. Avant cela, les pays du tiers monde revendiquent un droit au développement, sous-entendu gourmand en énergie, et demandent aux pays du Nord de prendre l’initiative. La Convention-cadre sur les changements climatiques (15 mai 1992) va clairement dans ce sens. Cependant, bien que les pays de l’O.C.D.E. aient ratifié ce traité, dans lequel ils s’engagent à stabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre, sa mise en oeuvre tarde et fait toujours l’objet d’âpres négociations.

¹ - Les Etats-Unis représentaient jusqu’ici une des causes de blocage des négociations.

² - A titre de comparaison, il a suffi de cinq ans pour régler le problème de l’appauvrissement de la couche d’ozone.

Les pays de l'O.C.D.E. avancent deux objections, toutes deux en rapport avec le manque de flexibilité de l'accord. L'Australie, le Canada, les Etats-Unis et le Japon plaident pour une flexibilité assise sur un système de permis de polluer négociables. Basset (Le Monde, 24 juin 1997) estime que « le bras de fer qui s'est engagé autour de la question des droits à émettre par pays ... devrait trouver sa conclusion » lors de la réunion internationale de Kyoto, fin 1997. L'autre critique concerne la lenteur de la mise en route du système d'« application conjointe », par lequel tout pays aurait la possibilité d'honorer ses engagements en finançant des projets écologiques à l'étranger. Sur ce terrain, les désaccords portent moins sur l'existence que sur le fonctionnement de ce mécanisme ; mais ils ont gelé son institution. La répartition des crédits de dépollution entre les deux partenaires d'un projet d'application conjointe est particulièrement controversée. En apparence, la logique voudrait que l'investisseur comptabilise comme sienne toute unité de dépollution qu'il aura financée à l'étranger et qu'il réduise son effort national d'autant. En fait, ce point de vue est inacceptable pour le pays hôte car l'aide étrangère augmente son coût de dépollution futur, puisqu'a priori les investissements valoriseront avant tout les projets les moins coûteux. Ce coût d'opportunité justifierait de dédommager le pays hôte, sous la forme d'un partage des crédits de dépollution par exemple. Un équilibre devra être trouvé entre ces deux points de vue pour que l'application conjointe voit le jour.

Dans ce chapitre, après avoir dressé un bilan précis des négociations internationales (les engagements, les réalisations et les sources de blocage) dans une première section, nous construirons un jeu statique à partir des travaux de Nordhaus & Yang (1996), de Oliveira-Martins & alli (1993) et de Manne (1993). Nous étudierons les conséquences régionales de l'application stricte des engagements souscrits, à savoir la réduction unilatérale des émissions de dioxyde de carbone par les pays de l'O.C.D.E. Nous montrerons que, en l'état actuel des choses, la Convention serait coûteuse pour les pays développés, avantageuse pour les autres. Tour à tour, nous traiterons des améliorations potentielles du traité, c'est-à-dire l'établissement d'un marché des permis d'émission et d'un système d'application conjointe, dans l'idée d'illustrer l'enjeu des négociations courantes du point de vue de l'O.C.D.E. Nous établirons que l'aménagement de la Convention dans ces directions réduirait les coûts

supportés par les pays de l’O.C.D.E., sans que cela suffise nécessairement pour qu’ils cessent d’être pénalisés.

7.1 - Droit international de l'environnement

Il n'est pas inutile de rappeler que la Convention-cadre sur les changements climatiques s'insère dans un contexte plus large de prolifération des traités sur l'environnement. Les aménagements du droit international de l'environnement traditionnel, intervenus depuis une quarantaine d'années, démontrent la volonté des Etats de gouverner leur environnement conjointement. Le protocole de Montréal, accord contraignant sur la couche d'ozone, illustre bien cette tendance.

Après avoir effectué ce cadrage dans une première sous-section, nous nous attacherons à “décornerquer” la Convention-cadre sur les changements climatiques et les aménagements intervenus depuis sa ratification. Nous verrons à quoi elle engage les Etats signataires, comment ces derniers ont interprété leur participation et nous approfondirons la notion d'application conjointe.

7.1.1 - Expériences de coopération internationale

Les espaces internationaux se définissent par la négative : relève de l'espace international tout ce qui ne fait pas partie du territoire d'un Etat, entendu au sens juridique, c'est-à-dire comme le lieu d'exercice des compétences souveraines et exclusives d'un pays. Les espaces internationaux sont donc la haute mer, les régions polaires, les espaces aérien et extra-atmosphérique.

Le régime juridique des espaces internationaux repose traditionnellement sur les principes de liberté d'accès et de gratuité. La base de ce régime est la non-appropriation des ressources internationales et l'égalité des pays devant celles-ci. Ce statut confère aux pays le droit d'exploiter toutes les ressources internationales selon leurs besoins. La seule contrainte à laquelle ils soient astreints est le principe de respect des autres utilisateurs. Dès lors, il n'est pas étonnant que la gestion des ressources internationales (dites aussi “ressources communes”) ou de celles qui relèvent de la juridiction de plusieurs Etats génère des conflits internationaux.

Le droit international de l'environnement traditionnel a prévalu longtemps mais il est devenu obsolète à mesure que les contraintes environnementales se sont durcies et diversifiées. Le vide juridique a dû être comblé et l'Institut Français des Relations Internationales (1991) note, à ce propos, que « les conventions et les traités en matière d'environnement ne cessent de se multiplier, surtout depuis les années 60 ». Le droit international de l'environnement a subi de nombreuses modifications suite à la ratification d'une multitude de conventions sectorielles, comme l'atteste le tableau 7.1. Toutes ces conventions internationales définissent des règles de coopération entre les Etats dans chaque domaine couvert.

Tableau 7.1 : Accords multilatéraux sur l'environnement (1933-90)

Thème	Nombre d'accords
Pollution marine	41
Pêche en mer et chasse à la baleine	25
Protection de la faune et de la flore	19
Pollution nucléaire et pollution atmosphérique	13
Antarctique	6
Règlements phytosanitaires	5
Lutte antiacridienne	4
Eaux limitrophes	4
Actes de cruauté envers les animaux	3
Déchets dangereux	1
Autres	6
Total	127

Source : G.A.T.T. (1992)

L'issue des négociations sur les émissions des chlorofluorocarbures et des halons, responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone, est exemplaire. Elle a été étonnamment rapide et s'est faite en trois étapes. En 1985, les Etats se réunirent à Vienne pour dresser un bilan scientifique, après la première observation par satellite du trou dans la couche d'ozone. En réponse, un protocole fut ratifié en 1987 à Montréal. Il prévoyait que les émissions de chlorofluorocarbures et de halons seraient ramenées au niveau de 1986 dès 1989, réduites de 20 pour-cent en 1993, puis de 50 pour-cent en 2000. A partir du protocole de Montréal, les négociations devinrent quasi permanentes et l'amendement de Londres, en 1990, devrait conduire à l'élimination complète des émissions d'ici à la fin du siècle.

I.F.R.I. (1991) estime que quatre conditions favorables ont aidé ce succès :

1. un diagnostic scientifique des risques incontesté ;
2. la maturation d'un consensus facilitée par des actions unilatérales (interdiction des chlorofluorocarbures et des halons en R.F.A., aux Etats-Unis et en Suède à partir du milieu des années 70) ;
3. un nombre limité de pollueurs ;
4. l'établissement de mécanismes financiers et de transferts technologiques pour inciter les pays en développement à adhérer à l'accord.

Il convient de noter que la situation est exactement inverse dans le cas de l'effet de serre. Pour autant, faut-il en conclure que les négociations sont condamnées à l'échec ?

7.1.2 - La Convention-cadre sur les changements climatiques

La Conférence de Rio de Janeiro, qui s'est tenue du 3 au 14 juin 1992, proposait aux pays et aux O.N.G. de réfléchir sur le développement et l'environnement, et surtout sur les liens qui les unissent. Deux textes sont nés de cette rencontre multilatérale, l'un s'occupant de la diversité génétique, l'autre de l'atmosphère et du climat. La Convention des Nations unies sur les changements climatiques a reçu 165 signatures et est entrée en vigueur le 21 mars 1994, 90 jours après la cinquantième ratification. Les parties qui l'ont ratifiée doivent s'y conformer. La Convention fait désormais partie de l'ensemble des règles légales qui gouvernent les relations entre les Etats et les organisations internationales.

7.1.2.1 - Contenu et engagements

L'article 2 précise clairement l'objectif de la Convention, qui est de « stabiliser ... les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ... dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable. »

Aveu partiel de l'échec des négociations en 1992, le texte ajoute qu'il s'agit là d'un objectif ultime que les négociations et les instruments futurs devraient poursuivre. Les dispositions de la Convention ne prévoient pas de réel calendrier d'exécution des engagements pris, ni ne quantifient vraiment les contributions de chacun. Les engagements auxquels souscrivent les parties ne sont définis que qualitativement.

L'article 4 de la Convention distingue trois catégories de signataires, différenciés d'après les engagements souscrits. Kiss (1993) insiste sur le caractère inhabituel de ce texte dans le droit international traditionnel qui, « en proclamant les responsabilités communes mais différencierées des parties contractantes, va à l'encontre des principes d'égalité des Etats et de réciprocité ».

Le paragraphe 1 de l'article 4 définit le tronc commun des engagements applicables à toutes les parties du traité. Au titre de ce paragraphe, tous les pays s'engagent pour l'essentiel : à publier et diffuser des informations sur leurs émissions de gaz à effet de serre ; à mettre en œuvre des programmes nationaux pour atténuer les changements climatiques ; à développer et partager les technologies de dépollution ; à maintenir et développer les puits de gaz à effet de serre ; à encourager la recherche sur les changements climatiques...

Dans le paragraphe 2 de l'article 4, les « pays développés parties et les autres parties figurant à l'annexe I » (voir le tableau 7.2) endosseront des engagements plus spécifiques. Notamment, ils limitent leurs émissions anthropiques ; ils renforcent leurs puits et leurs réservoirs de gaz à effet de serre. Sur ce point, le traité suggère que « le retour, d'ici à la fin de la décennie, aux niveaux antérieurs d'émissions anthropiques de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre » constituerait un objectif raisonnable, celui-ci pouvant être atteint individuellement ou conjointement. Le paragraphe 7 du même article exempte provisoirement les « pays en transition vers une économie de marché » de l'annexe I de s'acquitter de cette obligation pour « les mettre mieux à même de faire face aux changements climatiques » ; si bien que le paragraphe 2 ne concerne, en fait, que les pays de l'O.C.D.E.

L'annexe II de la Convention liste les pays qui font partie de la dernière catégorie (voir le tableau 7.2). Leurs engagements sont énumérés dans les paragraphes 3, 4 et 5 de l'article 4. Pour la plupart membres de l'O.C.D.E., ces pays promettent des « ressources financières nouvelles et additionnelles pour couvrir la totalité des coûts convenus encourus par les pays en développement du fait de ... l'application des mesures visées au paragraphe 1 » (§3) ; ils aident les pays en développement particulièrement vulnérables (§4) ; ils facilitent « l'accès de technologies et de savoir-faire écologiquement rationnels aux autres parties ».

Le paragraphe 7 de l'article 2 entérine l'inégalité des parties, en rendant l'application des engagements des pays en développement conditionnelle à l'exécution par les pays développés de leurs propres promesses (celles-ci sont rapportés ci-dessus).

Tableau 7.2 : Annexes de la Convention-cadre sur le climat

Annexe I		Annexe II
Allemagne	Fédération de Russie	Norvège
Australie	Russie	Nouvelle-Zélande
Autriche	Finlande	Zélande
Bélarus	France	Pays-Bas
Belgique	Grèce	Pologne
Bulgarie	Hongrie	Portugal
Canada	Irlande	Roumanie
Communauté européenne	Islande	Royaume-Uni
Danemark	Italie	Suède
Espagne	Japon	Suisse
Estonie	Lettonie	Tchécoslovaquie
Etats-Unis d'Amérique	Lituanie	Turquie
	Luxembourg	Ukraine
		Allemagne
		Irlande
		Australie
		Islande
		Autriche
		Italie
		Belgique
		Japon
		Canada
		Luxembourg
		Communauté européenne
		Norvège
		Danemark
		Nouvelle-Zélande
		Espagne
		Pays-Bas
		Etats-Unis d'Amérique
		Portugal
		Finlande
		Royaume-Uni
		France
		Suède
		Suisse
		Grèce

7.1.2.2 - Des interprétations nationales diverses

L'interprétation de la Convention par les pays ne figurant pas aux annexes I et II est contenue entièrement dans le paragraphe 7 de l'article 2 (voir ci-dessus). Ces derniers ne participeront pas à la lutte contre l'effet de serre avant d'avoir observé un premier pas de la part des pays développés. Le signal attendu concerne les mesures de dépollution prises et l'approvisionnement d'un Fonds mondial pour l'environnement, destiné à aider les pays en développement à remplir leurs obligations.

Concernant les pays de l'annexe I (en fait l'O.C.D.E.), la Convention suggère de prendre des mesures pour que leurs émissions, individuelles ou collectives, retrouvent le niveau de 1990 en l'an 2000. Cet objectif est indicatif, si bien que les engagements réels s'avèrent en fait très variés.

Tableau 7.3 : Engagements des pays de l'annexe I :
Réduction des émissions par rapport à l'année de référence

	2000	2005	Gaz ciblés	Année de référence
Allemagne		25 à 30%	CO2	1987
Australie	0% (+2%)	20% (+2%)	tous	1988
Autriche		20% (+2%)	CO2	1988
Belgique	5%	0%	CO2	1990
Canada		20% (+2%)	tous	1990
Danemark			CO2	1988
Espagne	-25%		CO2	1990
Etats-Unis	0%		tous	1990
Finlande	0%		CO2	
France	-4%		CO2	
Grèce		Engagement CEE		
Irlande	-20%		CO2	1990
Islande	0%		tous	1990
Italie	0%		CO2	1990
Japon	-3%		CO2	1990
Luxembourg	0%	20%	CO2	1990
Norvège	0% (+1%)		CO2	1989
Nouvelle-Zélande	0%		CO2	1990
Pays-Bas	4%		CO2	1990
Portugal		Engagement CEE		
Royaume-uni	0%		principaux	1990
Suède	0%		CO2	1990
Suisse	0%		CO2	1990
Turquie		Aucun engagement		

Source : A.I.E. (1994)

Notes : nous avons pris l'initiative de normaliser les données. Lorsque l'année de référence n'est pas 1990, nous corrigéons l'objectif de l'évolution des émissions entre les deux dates (valeur entre parenthèses). Pour la France et le Japon, qui souhaitent stabiliser leurs émissions par habitant, l'engagement dépend de l'évolution démographique de 1990 à 2000 (Source : Banque Mondiale, 1992).

Parmi les pays de l'O.C.D.E., la moitié s'est fixée l'objectif de stabiliser son émission de dioxyde de carbone au niveau de 1990 d'ici à la fin du siècle. Six pays s'engagent à agir également sur les autres gaz à effet de serre : l'Australie, le Canada, les Etats-Unis, l'Islande, les Pays-Bas et le Royaume-Uni. Par rapport à la position moyenne, quelques pays affichent des objectifs plus ambitieux et/ou de plus long terme : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la

Belgique, le Danemark, le Luxembourg et les Pays Bas. Au contraire, l'Espagne, la Grèce, l'Irlande, le Portugal et la Turquie s'annoncent plus réticents. Ils défendent leur position en invoquant leur retard de développement par rapport au reste de l'O.C.D.E. Malgré cela, il est à noter que l'Union européenne s'est engagée à stabiliser les émissions cumulées des pays membres, si bien que l'inaction des pays susdits devrait être compensée par les autres pays européens.

Les engagements ne sont pas toujours comparables : certains pays considèrent les émissions brutes, d'autres les émissions nettes (en comptabilisant le renforcement des puits) ; les Etats ayant pris des engagements sur plusieurs gaz à effet de serre se donnent la possibilité de stabiliser le potentiel de réchauffement global de leurs émissions (cas des Etats-Unis).

7.1.2.3 - Politiques nationales

Kiss (1996) dresse un bilan des suites constatées de la Convention. Il note que « l'engagement des Etats ... a été diversement respecté, tout comme la tâche des Etats développés de s'efforcer de revenir, en 2000, aux niveaux d'émissions de 1990 » (Kiss, 1996, p. 111). La première Conférence des parties ³, réunie à Berlin en avril 1995, consciente du peu de progrès réalisés, a décidé la rédaction d'un protocole additionnel réaffirmant les obligations des pays développés.

Le bilan ne s'est guère amélioré depuis la Conférence des parties de Berlin. Réunis à nouveaux à New York en 1997, les pays signataires et les O.N.G. n'ont pu que déplorer l'attentisme général. Les émissions de gaz carbonique ont augmenté, entre 1992 et 1996, de 28 pour-cent en Inde, 27 pour-cent en Chine ; cette tendance est générale dans les pays en développement. L'évolution des émissions des pays de l'O.C.D.E. n'est guère plus

³ - La Conférence des parties est « l'organe suprême de la Convention ». Elle « fait régulièrement le point de l'application de la Convention et de tous autres instruments juridiques connexes qu'elle pourrait adopter et prend, dans les limites de son mandat, les décisions nécessaires pour favoriser l'application effective de la Convention. » : Convention-cadre sur les changements climatiques (1992, Article 7, paragraphe 1)

encourageante. Entre 1992 et 1996, elles ont augmenté de 8 pour-cent aux Etats-Unis et au Japon. Seuls quelques pays de l'Union européenne sont parvenus à maîtriser leurs rejets.

Ces chiffres montrent que, dans l'ensemble, les membres de l'O.C.D.E. ne tentent rien pour respecter leurs engagements, puisque les taux de croissance de leurs rejets avant et après la ratification de la Convention sont comparables. Il existe malgré tout quelques exceptions. Notamment, les pays nordiques montrent l'exemple en ayant instauré très tôt de nouvelles taxes visant expressément à réduire les émissions de carbone. En 1992, la Suède et la Norvège appliquaient des taxes supplémentaires sur les carburants atteignant l'équivalent de 1 à 2 dollars par tonne de carbone (Haugland & alli, 1992).

7.1.2.4 - Aménagements de la Convention

Dans sa première version, la Convention ne définissait pas la notion essentielle d'application conjointe. Elle se contentait de proposer que les pays de l'annexe I puissent « appliquer de telles politiques et mesures [la stabilisation des émissions] en association avec d'autres parties et aider d'autres parties à contribuer à l'objectif de la Convention ». L'approfondissement de ce système était renvoyé à la première session de la Conférence des parties (Article 4, paragraphe 2, alinéa d).

La première réunion de Berlin (1995) a « fait un pas vers l'extension du système des “permis négociables” au plan international » (Kiss, 1996, p. 111) mais n'a pas fait progresser la définition de l'application conjointe. Le débat n'est pas encore clos à ce jour puisqu'il a été repoussé, lors de la récente rencontre internationale de New York, pour la fin 1997.

Les attitudes vis-à-vis de l'application conjointe sont fort variées. Globalement, on peut opposer deux camps. Les pays de l'O.C.D.E. y sont favorables à condition que des critères précis soient définis après négociation. Au sein de ce groupe, une divergence de vue existe quant au moment adéquat de l'entrée en vigueur d'un tel système (voir le tableau 7.4). Les pays en développement y sont majoritairement opposés pour diverses raisons. D'abord, ils craignent que les activités d'application conjointe réduisent les efforts de dépollution des pays

développés. De plus, ils redoutent que les échanges financiers afférents aux activités d'application conjointe détournent les pays développés de leurs autres engagements financiers : le Fonds pour l'environnement mondial et l'aide au développement.

Tableau 7.4 : Avis des pays de l'O.C.D.E. sur la mise en place de l'application conjointe

Application immédiate Application future	Avis favorable	Avis défavorable	Ne l'utiliseront pas pour l'instant
Avis favorable sous certaines conditions	Autriche Finlande Islande	Danemark Union eur. Suisse	Belgique
Avis favorable	Australie Italie Etats-Unis	Allemagne Pays-Bas Nouvelle-Zélande Royaume-Uni	Japon Norvège
Aucune position déclarée	France		Espagne

Source : A.I.E. (1994)

La réunion de ces oppositions a abouti, après de difficiles négociations, à un certain nombre de pistes de réflexion qui préfigurent les règles de fonctionnement de l'application conjointe. Il a été reconnu que :

- l'application conjointe devrait être dissociée des autres engagements financiers des pays développés ;
- les réalisations d'application conjointe devraient être mutuellement bénéfiques (aussi bien du point de vue environnemental, qu'économique et social) et que les crédits de dépollution pourraient être partagés.

7.2 - Respect strict des engagements de la Convention

La littérature économique fournit un certain nombre d'évaluations des coûts et des avantages régionaux de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. A moins que les gouvernements ne fassent intervenir des critères extra-économiques dans leur décision, ou bien que les évaluations disponibles ne soient pas fiables, ces données renseignent sur leur intention en matière de lutte contre le renforcement de l'effet de serre et sur leur point de vue quant à l'accord scellé par la Convention-cadre sur les changements climatiques. La question

que nous posons est donc la suivante : une analyse basée sur ces évaluations apporte-t-elle un éclairage constructif sur l'état actuel des négociations et des réalisations ?

Synthétiquement, trois constats résument la situation présente :

- les pays de l’O.C.D.E. doivent réduire unilatéralement leurs émissions ;
- la Convention ne définit pas suffisamment l’interprétation à donner à cet engagement : individuel ou collectif, strictement régional ou en suscitant la participation des autres pays ;
- les promesses n’ont pas été tenues sous le prétexte d’un manque de flexibilité de l’accord.

L’objet des discussions à venir sera d’illustrer chacun de ces points sur la base des estimations économiques réunies dans les chapitres 2, 3 et 6. Nous chercherons donc à apporter quelques éléments de réponse aux interrogations suivantes :

- la stabilisation des émissions par les pays de l’O.C.D.E. est-elle un objectif provisoire raisonnable ?
- des protocoles additionnels, qui énonceraient des règles opérationnelles concernant un système de permis échangeables et l’application conjointe, sont-ils nécessaires ?
- les pays en développement devraient-ils participer dès maintenant à la politique climatique et à quelles conditions ?

A notre avis, les pourparlers actuels ne visent pas la résolution définitive du problème, à savoir la stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. L’accord obtenu n’est qu’une étape intermédiaire au terme de laquelle la question d’une participation active des pays non-membres de l’O.C.D.E. se posera inévitablement. Le jeu que nous emploierons sera donc statique. Il simulera les intérêts régionaux à un instant donné (l’année de calibrage) indépendamment des retombées futures des décisions.

7.2.1 - Modèle et calibrages

Par nécessité, compte tenu des données disponibles, mais aussi parce que ce découpage décrit correctement les forces en présence et les coalitions de fait apparues dans le traité, nous considérons les six régions suivantes : les Etats-Unis, le Japon, l’Union européenne, l’ex-U.R.S.S., la Chine et le reste du monde. Chaque pays est souverain.

Les pays choisissent leur politique climatique en comparant le coût économique de la réduction des émissions de dioxyde de carbone au bénéfice intertemporel associé. Formellement, nous supposons que le bénéfice et le coût de la réduction des émissions de gaz carbonique d'un pays quelconque sont donnés respectivement par :

$$B_i(q_i) = b_i \cdot Q, \quad (7.1)$$

$$C_i(q_i) = c_i \cdot q_i^{d_i}, \quad (7.2)$$

où

b_i est le bénéfice intertemporel d'une réduction des émissions de 1 GtC,

c_i est le coût de la réduction des émissions de 1 GtC,

d_i est l'élasticité du coût de dépollution par rapport aux émissions,

q_i est la réduction des émissions de carbone,

$Q = \sum_i q_i$ est la dépollution mondiale.

La spécification choisie pour la fonction de bénéfice est courante dans la littérature sur les pollutions transfrontières (Barrett, 1992 et 1994 ; Botteon & Cararro, 1994). Le calibrage de ces fonctions s'appuie sur les résultats de Nordhaus & Yang (1996). Les taxes non coopératives qu'ils calculent mesurent les bénéfices intertemporels nationaux de la réduction d'une tonne de l'émission mondiale de dioxyde de carbone ; elles fournissent donc une évaluation appropriée des paramètres b_i . Les valeurs retenues pour le bénéfice marginal des différents pays sont données dans le tableau 7.5.

Une spécification alternative, également fréquente dans la littérature, implique un bénéfice marginal décroissant avec l'effort de dépollution (Barrett, 1992 et 1994). Nous l'avons écartée en raison du caractère particulier de l'externalité climatique. Puisque le dommage est proportionnel au stock de gaz à effet de serre, une action ponctuelle sur le flux d'émission a un effet négligeable sur les dommages futurs. Ainsi, seule une réduction forte et répétée des émissions aurait pour effet de réduire les bénéfices marginaux. Ceci justifie notre choix.

Afin d'assurer nos résultats, nous utiliserons trois calibrages différents des fonctions de coût de réduction des émissions (voir l'annexe 7.1) : le premier sera déduit des résultats de

Oliveira-Martins & alli (modèle GREEN, 1993) ; le second des évaluations de Manne (modèle MR, 1993) ; le troisième reprend les fonctions de Nordhaus & Yang (modèle RICE, 1996). Cependant, pour ne pas surcharger la discussion, nous privilégierons le calibrage tiré de GREEN, en reléguant les autres résultats en annexe (voir l'annexe 7.2 pour MR et l'annexe 7.3 pour RICE). Une section récapitulative viendra conclure la simulation principale, basée sur le modèle GREEN, en faisant ressortir les différences les plus marquantes.

Tableau 7.5 : Calibrage des fonctions à partir de trois modèles (année 2000)

Pays	b		c		d		
	RICE	RICE	GREEN	MR	RICE	GREEN	MR
Etats-Unis	0,65	98,26	855,21	425,05	2,89	3,29	2,52
Europe	0,87	368,17	2292,96	279,80	2,89	2,85	2,28
Japon	0,33	1941,24	3313,29		2,89	2,56	
Ex-URSS	0,10	64,37	95,98	267,23	2,89	2,49	1,35
Chine	0,07	79,89	139,84	292,72	2,89	2,76	1,31
Reste du monde	0,02	27,48	214,18	386,05	2,89	3,03	1,90

Remarque 7.1 : le paramètre de la fonction de coût du “reste du monde” décrit le coût agrégé de la région. La fonction individuelle se déduit de la première en formulant l’hypothèse d’identité des pays, puis en remplaçant le paramètre c_i par $c_i \cdot N^{d_i-1}$, où N est le nombre de pays de la région.

Remarque 7.2 : les fonctions de coût utilisées proviennent de modèles d’équilibre général appliqués. Ce calibrage sous-entend donc que les politiques nationales sont réalisées au moindre coût, au moyen d’une taxe sur les émissions ou d’un système de permis échangeables. Dans le cas contraire, les fonctions sous-estimeraient les coûts supportés par les pays. Cette remarque s’applique particulièrement à l’Union européenne, traitée comme un centre de décision unique, alors que l’harmonisation des politiques environnementales nationales n’est pas une chose acquise d’avance.

Remarque 7.3 : le bénéfice marginal mondial de la réduction des émissions est égal à la taxe coopérative du modèle Nordhaus & Yang (1996), i.e. 6,19 dollars par tonne.

Avant de poursuivre en présentant nos simulations, quelques mises en garde et quelques éclaircissements méthodologiques s'imposent. Le principal point faible de ce travail provient de l'idée selon laquelle les avantages de la réduction des émissions de dioxyde de carbone, calculés par Nordhaus & Yang (1996), représenteraient correctement les évaluations personnelles des décideurs politiques.

En fait, le processus par lequel les gouvernements établissent leur appréciation ne coïncide pas nécessairement pleinement avec la méthode qui conduit aux données du tableau 7.5. En premier lieu, les objectifs électoraux peuvent faire diverger leur position de l'intérêt collectif, pour s'attirer le soutien de groupes de pression (il est difficile d'apprécier dans quel sens ce mécanisme agirait sachant l'action opposée des mouvements écologistes et des lobbies industriels). En second lieu, si certains pays se montrent altruistes, hypothèse non explorée par Nordhaus & Yang, leur évaluation du bénéfice de la lutte contre l'effet de serre risque d'être plus grande. En troisième lieu, dans le contexte d'incertitude scientifique actuel, les décideurs peuvent avoir une perception surtout subjective des dommages. Si tel est le cas, leur appréciation tiendrait compte d'effets non comptabilisés par les évaluations économiques des dommages : des risques de catastrophes écologiques, des effets secondaires imprévisibles comme, par exemple, un durcissement des relations Nord-Sud... La liste des raisons d'une divergence possible entre les estimations "scientifiques" des avantages et les valeurs implicites utilisées par les décideurs pour mener leurs négociations pourrait sûrement être allongée.

Dans ces conditions, quel crédit doit-on accorder à nos simulations ? Pour notre part, nous les concevons comme un support de réflexion. L'important est de décrire, dans les grandes lignes, les insuffisances du traité dans sa forme actuelle et de montrer comment il pourrait être amélioré. Autrement dit, les valeurs ne nous intéressent pas en tant que telles ; elles servent seulement à faire des comparaisons.

Au-delà de cet aspect, qui est déjà présent dans d'autres études techniquement plus performantes (Martin & alli, 1992 ; Nicoletti & Oliveira-Martins, 1994), notre analyse a deux qualités. Premièrement, l'introduction des avantages, bien que sujette à controverse, est

préférable à l'hypothèse sous-jacentes “avantages = 0” des analyses susdites. Deuxièmement, nous prenons acte du fait que la Convention est une première étape provisoire avant le règlement définitif des négociations, alors que ces mêmes études prolongent l'équilibre actuel des négociations dans le temps.

7.2.2 - Situations de référence

Les deux points de repère du jeu sont l'équilibre de Nash et l'équilibre coopératif. Le premier figure la situation de statu quo ; tout pays accepte de participer à un accord international à condition que cela lui procure un avantage net par rapport au statu quo. Le second définit l'accord le plus efficace, tant du point de vue de la dépollution globale que de celui de la répartition de cette dernière entre les régions du monde (indépendamment de toute considération éthique).

On détermine très simplement l'équilibre de Nash et l'équilibre coopératif du jeu :

- le bien-être d'un pays quelconque est maximum lorsque son coût marginal de dépollution égale son bénéfice marginal national : $C'_i(q_i) = d_i \cdot c_i \cdot q_i^{d_i-1} \equiv b_i = B'_i(Q)$;
- à l'équilibre coopératif, le pays internalise en plus les bénéfices marginaux ressentis à l'étranger : $C'_i(q_i) = d_i \cdot c_i \cdot q_i^{d_i-1} \equiv \sum_i b_i = \sum_i B'_i(Q)$.

Les dépollutions de Nash et coopérative du pays i sont donc égales, respectivement, à :

$$\bar{q}_i = \left[\frac{b_i}{d_i \cdot c_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}, \quad (7.3)$$

$$q_i^* = \left[\frac{\sum b_i}{d_i \cdot c_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}. \quad (7.4)$$

Tableau 7.6 : Equilibre coopératif et équilibre de Nash (année 2000)

Pays	Nash		Coopération	
	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)
Etats-Unis	0,026	0,030	0,069	0,120
Europe	0,008	0,045	0,023	0,284
Japon	0,002	0,018	0,010	0,103
Ex-URSS	0,005	0,005	0,086	-0,175
Chine	0,007	0,004	0,095	-0,187
Reste du monde	0,006	0,228	0,101	1,397
Total	0,055	0,330	0,384	1,542

Note : les gains correspondent à une amélioration du bien-être par rapport à la solution de marché (le scénario de politique inchangée).

7.2.3 - Politiques unilatérales de la région O.C.D.E.

Nous souhaitons analyser les conséquences de l'application stricte par les pays de l'O.C.D.E. des engagements auxquels ils ont souscrit en ratifiant la Convention. L'objectif est la stabilisation de leur émission de dioxyde de carbone. Il correspond approximativement aux programmes qu'ils ont annoncés. Cet objectif peut se décliner en une multitude d'actions différentes, que nous étudierons dans les sous-sections prochaines : il peut être atteint individuellement, sans compensations possibles ; il peut être conjoint, à l'aide d'un système de permis négociables ; pour finir, les pays de l'O.C.D.E. peuvent souhaiter associer les autres régions du monde à leur politique en y finançant des projets de dépollution.

7.2.3.1 - La stabilisation des émissions de l'O.C.D.E.

Actuellement, l'action unilatérale des pays de l'O.C.D.E. est l'issue la plus probable : la Convention n'impose aucune mesure de dépollution aux pays en développement ; le flou qui entoure l'application conjointe limite fortement leur participation indirecte sous l'impulsion d'un financement des pays du Nord. Ces raisons nous incitent à étudier les conséquences d'une stabilisation des émissions des pays de l'O.C.D.E. sans contribution des autres régions. Par contre, deux possibilités sont envisageables. Le scénario n°1 sera celui où chaque pays de

l’O.C.D.E. limite individuellement son émission de carbone ⁴. Le scénario n°2 décrira le cas où l’O.C.D.E. stabilise conjointement ses émissions et crée un marché de permis de polluer pour répartir efficacement les efforts nationaux ⁵.

Dans le scénario n°1, les parties de l’annexe I reçoivent des quotas d’émission \bar{E}_i donnés (l’indice i désignera toujours un membre de l’O.C.D.E.). Chaque pays va donc chercher à maximiser son bien-être $\Pi_i = B_i(Q) - C_i(q_i)$ en respectant ses obligations internationales. Ce programme se résout en écrivant le Lagrangien et en définissant par p_i le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte d’émission :

$$\mathcal{L}_i = B_i(Q) - C_i(q_i) + p_i \cdot [\bar{E}_i - (E_i - q_i)], \quad (7.5)$$

$$\text{avec } \bar{E}_i - (E_i - q_i) \geq 0, \quad p_i \geq 0 \text{ et } p_i \cdot [\bar{E}_i - (E_i - q_i)] = 0,$$

où E_i mesure les émissions du pays lorsqu’il ne prend aucune mesure.

Le quota attribué n’est pas contraignant lorsque l’émission de Nash du pays lui est inférieure, i.e. lorsque $\bar{E}_i - (E_i - \bar{q}_i) \geq 0$. Dans ce cas, le multiplicateur de Kuhn et Tucker est nul et le pays se contente d’appliquer sa stratégie de Nash. Dans le cas contraire, la contrainte est serrée, le multiplicateur de Kuhn et Tucker est positif et la dépollution du pays satisfait juste son engagement, i.e. $q_i = E_i - \bar{E}_i$. Le pays applique alors une taxe supplémentaire p_i pour respecter sa promesse :

$$p_i = d_i \cdot c_i (E_i - \bar{E}_i)^{d_i-1} - b_i. \quad (7.6)$$

⁴ - A l’exception du Japon, qui a adopté l’objectif d’une stabilisation de ses émissions de carbone par habitant.

⁵ - Sous certaines hypothèses, i.e. lorsque les fonctions de bénéfice et de coût sont connues avec certitude, le système de permis de polluer échangeables et la taxe régionale sur les émissions sont équivalents du point de vue du résultat. Pour décrire les négociations internationales, le système de permis de polluer a l’avantage d’introduire simplement des compensations entre les pays. La même étude pourrait être menée avec une taxe régionale, à condition de redistribuer les recettes fiscales de manière à reproduire les transferts latéraux implicites des échanges de permis.

Avec le scénario n°2, les quotas d'émission \bar{E}_i attribués sont échangeables sur un marché de concurrence pure et parfaite au prix p . Le bien-être du pays i s'écrit :

$$\Pi_i = B_i(Q) - C_i(q_i) + p \cdot [\bar{E}_i - (E_i - q_i)]. \quad (7.7)$$

Le terme entre crochets détermine l'offre nette de permis d'émission du pays : lorsque son émission $E_i - q_i$ est inférieure à sa dotation \bar{E}_i , il cherche à vendre ses permis excédentaires sur le marché ; dans le cas contraire, il se porte acquéreur de permis d'émission sur le marché. Son émission optimale dépend du prix d'échange des quotas puisqu'à l'optimum :

$$q_i = \left[\frac{b_i + p}{d_i \cdot c_i} \right]^{\frac{1}{d_i - 1}}. \quad (7.8)$$

Le prix des permis négociables équilibre l'offre et la demande de permis sur le marché :

$$p / \sum_i q_i \equiv \sum_i [E_i - \bar{E}_i] \equiv \bar{Q}, \quad (7.9)$$

où \bar{Q} est l'objectif de dépollution visé par l'O.C.D.E.

Tableau 7.7 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E.

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répartition optimale des émissions dans l'OCDE (GtC) (b)	Gains (milliards de \$) (c)	
				scén. n°1 Quotas non négociables	scén. n°2 Permis négociables
Etats-Unis	1,497	1,339	1,306	-1,775	-1,405
Europe	0,884	0,813	0,802	-0,960	-0,883
Japon	0,417	0,329	0,373	-6,442	-3,781
Ex-URSS	1,221	Nash	Nash	0,028	0,028
Chine	0,875	Nash	Nash	0,020	0,020
Reste du Monde	2,177	Nash	Nash	1,174	1,174
Total	7,071	6,735	6,735	-7,955	-4,847

Notes :

(a) : Projections de Oliveira-Martins & alli (1993), correspondant au scénario de politique inchangée. La mention "Nash" signifie que les émissions effectives sont égales à la quantité projetée moins la dépollution de Nash ;

(b) : Le prix des permis d'émission serait de 62,8 dollars par tonne.

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash (une valeur négative correspond à une perte).

Au vu du tableau 7.7, il apparaît que la Convention profite aux pays non-membres de l’O.C.D.E. Les pays de l’O.C.D.E. subissent des pertes ⁶. Le Japon perd plus car, selon les projections de GREEN, ses émissions devraient augmenter fortement ; la stabilisation des émissions par habitant serait une mesure particulièrement contraignante pour ce pays, synonyme d’une baisse d’environ un cinquième de ses émissions en 2000, trois fois plus importante qu’en Europe.

La possibilité d’échanger les permis d’émission réduirait les pertes au sein de l’O.C.D.E. d’un tiers environ. La répartition de ce gain entre les membres de l’O.C.D.E. dépend de la distribution primaire des permis d’émission. Ici, nous avons supposé qu’elle coïncide avec les engagements souscrits par chacun d’entre eux, i.e. la stabilisation individuelle. Dans cette hypothèse, les Etats-Unis seraient le principal exportateur de permis de polluer (les trois quarts du volume total) tandis que le Japon serait l’unique importateur. La création du marché des permis de polluer profiterait à tous (principalement au Japon).

L’inconvénient d’un système de permis négociables est qu’il n’existe, a priori, aucune règle pour répartir les quotas d’émission entre les pays, alors que ce choix conditionne les gains de chacun. Les critères d’attribution les plus fréquemment avancés sont : le P.I.B., la population, les émissions par unité de P.I.B. ou par tête, les émissions cumulées du pays comme mesure de sa responsabilité passée dans le renforcement de l’effet de serre... On comprend sans difficulté que le choix d’un critère (ou d’une combinaison de critères) peut donner lieu à des négociations inextricables.

Pour conclure les commentaires sur ces premières simulations, notons que la stabilisation des émissions de l’O.C.D.E. au niveau de 1990 réduirait les émissions de l’an 2000 de 336 millions de tonnes, ce qui serait assez proche de la dépollution optimale de 384 millions de tonnes pour cette date. Ainsi, à condition que le bénéfice mondial de la réduction des émissions de carbone soit de 6,19 dollars par tonne et à condition que les estimations de Oliveira-Martins & alli reflètent correctement les coûts de la réduction des émissions de

⁶ - Elles resteraient modérées, comprises entre 0,03 pour-cent du P.I.B. pour les Etats-Unis et 0,19 pour-cent du P.I.B. pour le Japon (Calculs faits à partir des projections des P.I.B. données par Oliveira-Martins & alli (1993)).

dioxyde de carbone, la Convention-cadre sur les changements climatiques aurait adopté un objectif provisoire de dépollution globale relativement raisonnable.

Par contre, la répartition des obligations entre les différentes régions du monde est inefficace. En effet, alors que la politique optimale dégagerait un gain collectif de 1,2 milliards de dollars environ par rapport à la non-coopération, la politique préconisée par le traité réduit le produit mondial de 8 milliards de dollars ; ce coût serait ramené à 5 milliards de dollars si un marché de permis de polluer était institué. Les inconvénients de cette inefficacité seraient supportés intégralement par les pays de l’O.C.D.E. Dès lors, doit-on s’étonner qu’ils n’aient pas tenu leurs promesses ?

7.2.3.2 - L’application conjointe au secours de l’O.C.D.E.

La situation de blocage décrite par la première simulation n’est peut-être pas fatale. En principe, la Convention-cadre sur les changements climatiques offre à tout pays la possibilité de remplir ses engagements en finançant des projets de dépollution étrangers. Malheureusement, les pays ne donnent pas tous le même sens à l’application conjointe, ce qui a nui à la définition des critères nécessaires à son application et fait que les expériences sont restées très peu nombreuses. Dans cette section, nous montrons l’intérêt du projet d’application conjointe.

Nous restons dans l’hypothèse d’une politique unilatérale de stabilisation des émissions de l’O.C.D.E. Mais, à la différence du problème précédent, chaque membre de l’O.C.D.E. est autorisé à financer des projets de dépollution dans les autres régions du monde.

Ainsi, le pays i peut offrir de subventionner à hauteur de τ_i dollars chaque tonne de rejet évité par les pays hors O.C.D.E. (au-delà de leur équilibre de Nash). En contrepartie de la dépollution A_i financée, la Convention lui octroie A_i droits d’émission supplémentaires⁷.

⁷ - La répartition des droits entre l’investisseur et le pays hôte pourrait faire l’objet d’une négociation. Dans notre exemple, l’investisseur reçoit tous les crédits de dépollution mais l’autre pays pourrait souhaiter en

Sa dotation en permis est $\bar{E}_i + A_i$ et son bien-être devient :

$$\Pi_i = B_i(Q) - C_i(q_i) + p \cdot [\bar{E}_i + A_i - (E_i - q_i)] - \tau_i \cdot A_i. \quad (7.10)$$

On démontre sans difficulté que la subvention optimale des applications conjointes est égale au prix des permis négociables puisque ⁸ :

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial A_i} = p - \tau_i = 0. \quad (7.11)$$

Ce résultat est évident. L'achat de droits d'émission et le financement de projets d'application conjointe sont deux actions concurrentes. Si la subvention est supérieure au prix des permis d'émission, mieux vaut se procurer des permis sur le marché que financer une application conjointe. Inversement, si la subvention est inférieure au prix des permis d'émission, le pays préférera financer un projet étranger plutôt qu'acquérir des permis d'émission.

Jones (1994) entrevoit trois façons différentes d'organiser l'application conjointe pour faire se rencontrer les demandes d'investissements de la part des pays développés et les offres de projets de la part des autres pays. La première voie consisterait à alimenter le Fonds pour l'environnement mondial géré par la Banque Mondiale. L'organisme aurait pour mission de recenser les projets les moins coûteux, de financer leur réalisation, puis de répartir les crédits d'émission au prorata des sommes investies. L'application conjointe pourrait aussi s'organiser sur la base d'accords bilatéraux et multilatéraux de coopération. C'est de cette manière que la Norvège l'envisageait en lançant deux projets pilotes d'application conjointe en Pologne (la substitution du gaz naturel au charbon pour le chauffage des locaux résidentiels) et au Mexique (des éclairages économies en énergie). La dernière approche impliquerait directement des entreprises privées dans les investissements d'application

recevoir une partie par anticipation sur ses engagements futurs. La justification économique de ce partage se trouverait dans le fait que le pays de l'O.C.D.E. capte les projets de dépollution peu coûteux.

⁸ - Par hypothèse, puisque les pays de l'O.C.D.E. n'utilisent l'application conjointe que pour réaliser un objectif donné de dépollution collective, tout accroissement de la dépollution global par l'application conjointe est

conjointe. Coppel défend plutôt l'approche institutionnelle. A son avis, elle réduirait les coûts de transaction et, en développant une perspective mondiale plutôt que nationale, augmenterait l'efficacité des investissements. En outre, la neutralité de cette « tierce partie » conférerait une plus grande légitimité au système d'application conjointe et amoindrirait les réticences nationales.

Quel que soit le vecteur par lequel un pays hôte reçoit les propositions d'application conjointe, il détermine son offre de projet de manière à maximiser son bien-être, somme du bénéfice net de la dépollution et des subventions reçues⁹ :

$$\Pi_j = B_j(Q) - C_j(q_j) + p(q_j - \bar{q}_j). \quad (7.12)$$

Il exprime donc une offre d'application conjointe égale à :

$$q_j - \bar{q}_j = \left[\frac{b_j + p}{d_j \cdot c_j} \right]^{\frac{1}{d_j - 1}} - \bar{q}_j. \quad (7.13)$$

L'application conjointe augmente la dotation en permis d'émission des pays de l'O.C.D.E. Ainsi, l'offre potentielle de permis d'émission augmente. Dans le même temps, la demande se raréfie car elle est en partie captée par les investissements d'application conjointe. Le prix d'équilibre des permis doit donc diminuer (la dépollution optimale d'un pays de l'O.C.D.E. est déterminée par l'expression (7.8))¹⁰ :

$$p / \sum_i q_i \equiv \sum_i [E_i - \bar{E}_i] - \sum_i A_i \equiv \bar{Q} - \sum_i A_i. \quad (7.14)$$

immédiatement suivi d'une baisse de la dépollution de l'O.C.D.E. (voir la relation (7.14)). On a donc $\partial Q / \partial A \equiv 0$.

⁹ - Formellement, l'application conjointe telle que nous l'envisageons produit le même résultat qu'un marché mondial des permis d'émission ouvert à tous et où chaque pays non-membre de l'O.C.D.E. recevrait une dotation égale à son émission de Nash. Cette proposition est évidente si l'on compare les relations (7.7) et (7.12).

¹⁰ - Par hypothèse, seuls les pays de l'O.C.D.E. ont accès au marché des permis d'émission.

Le tableau 7.8 synthétise les résultats de deux simulations associées, respectivement, aux scénarios n°3 et n°4. La première suppose que la zone géographique concernée par les projets d'application conjointe est limitée à l'ex-U.R.S.S. Elle s'inspire de l'annexe I de la Convention, qui associe l'O.C.D.E., les pays d'Europe centrale et orientale et la Fédération de Russie dans le projet de stabilisation des émissions. Cette communauté d'action est en fait fictive car les pays en transition vers l'économie de marché ont négocié un report de leurs obligations.

Tableau 7.8 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E. et application conjointe

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répart. opt. des émiss°		Gains (milliards de \$) (c)	
			scén. n°3 Ex-URSS (GtC) (b)	scén. n°4 Monde (GtC) (b)	scén. n°3 Ex-URSS	scén. n°4 Monde
Etats-Unis	1,497	1,339	1,392	1,432	-1,144	-0,348
Europe	0,884	0,813	0,845	0,862	-0,467	-0,022
Japon	0,417	0,329	0,399	0,408	-1,105	-0,293
Ex-URSS	1,221	Nash	1,061	1,149	1,419	0,200
Chine	0,875	Nash	Nash	0,794	0,020	0,224
Reste du monde	2,177	Nash	Nash	2,089	1,174	1,417
Total	7,071	6,735	6,735	6,735	-0,104	1,177

Notes :

(a) : Projections de Oliveira-Martins & alli (1993), correspondant au scénario de politique inchangée. La mention "Nash" signifie que les émissions effectives sont égales à la quantité projetée moins la dépollution de Nash ;

(b) : Le prix des permis d'émission et la subvention seraient de : 15,5 dollars par tonne dans le scénario n°3 ; 4,6 dollars par tonne dans le scénario n°4.

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash (une valeur négative correspond à une perte)

Plusieurs raisons poussent à interpréter ces dispositions particulières comme un appel à la collaboration avec les pays de l'O.C.D.E. En premier lieu, il est paradoxal que les pays d'Europe de l'est et la Fédération de Russie aient adhéré aux engagements spécifiques de l'annexe I pour, finalement, réclamer une clause qui les en exempte (d'autant plus que l'accession à ce statut est possible à tout moment et à n'importe quel pays). En second lieu, l'application conjointe semble, dans un premier temps, concerner plutôt les Parties de l'annexe I, certains pays en développement y étant farouchement opposés. Pour finir, la

coopération dans le domaine de l'environnement entre les pays occidentaux et les anciens pays socialistes est d'ores et déjà engagée¹¹.

La simulation associée au scénario n°3 montre l'intérêt d'une collaboration avec l'ex-U.R.S.S. L'exploitation de toutes les possibilités d'application conjointe avec l'ex-U.R.S.S., situation caractérisée par l'égalisation des coûts marginaux de dépollution dans toute la zone, rendrait la contrainte de stabilisation des émissions beaucoup moins lourde à supporter : les coûts diminueraient de 20 pour-cent aux Etats-Unis, 50 pour-cent en Europe et 70 pour-cent au Japon. A volume constant, l'O.C.D.E. se chargerait de la moitié de la réduction mondiale des émissions de carbone, contre 95 pour-cent en l'absence d'application conjointe. En contrepartie, l'ex-U.R.S.S. produirait presque 50 pour-cent de la dépollution mondiale. Elle aurait intérêt à accepter cette situation car les subventions reçues excéderaient largement les coûts supplémentaires encourus. Cependant, malgré l'amélioration nette de la situation des pays de l'O.C.D.E., la région subirait toujours une perte nette et, compte tenu du calibrage que nous utilisons et des conditions que nous avons posées, pourrait refuser de respecter ses engagements.

Le scénario n°4 élargit le système d'application conjointe à l'échelle du monde. Notre simulation fait état d'un déplacement massif des efforts de dépollution. Les pays hors O.C.D.E. assureraient alors plus de 70 pour-cent de la réduction des émissions, à parts égales entre l'ex-U.R.S.S., la Chine et le reste du monde. L'extension de l'application conjointe à toutes les régions serait acceptable du point de vue des pays en développement et réduirait fortement les coûts supportés par l'O.C.D.E. Ce système serait efficace à la condition que les coûts de transaction soient faibles. Il permettrait d'égaliser les coûts marginaux de réduction des émissions partout. Ceci se traduirait par un gain mondial proche de celui qui serait obtenu en régime de coopération totale. La différence essentielle entre la politique optimale et la stabilisation des émissions de l'O.C.D.E. assortie d'un système d'application conjointe

¹¹ - Une étude de l'O.C.D.E. (1995a) indique que « les fonds polyvalents pour l'environnement sont des mécanismes de plus en plus souvent utilisés pour financer les dépenses liées à l'environnement dans bon nombre de pays d'Europe centrale et orientale, y compris les nouveaux Etats indépendants de l'ex-Union Soviétique » (1995, p.7). Par exemple, en 1993, les aides accordées s'élèvent à 198,5 millions de dollars pour la Pologne, 107 millions de dollars pour la République Tchèque, 35 millions de dollars pour la République Slovaque...

exhaustif résiderait alors dans l'affectation finale des gains. Dans le premier cas, l'ex-U.R.S.S. et la Chine sont les perdants. Dans l'autre cas, l'O.C.D.E. finance implicitement la participation de ces régions et subit des pertes.

7.2.3.3 - Résultats obtenus avec les autres calibrages

Les fonctions de coût calibrées sur le modèle de Manne (1993) (voir l'annexe 7.2) impliquent une plus grande difficulté à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Ainsi, l'application uniforme de la taxe coopérative de 6,19 dollars par tonne dans toutes les régions réduirait les émissions de l'année 2000 de moins de 1 pour-cent. Il s'ensuit que la politique unilatérale de l'O.C.D.E., qui réduit l'émission mondiale de presque 7 pour-cent, serait une mesure exagérée à ce niveau de bénéfice par tonne. Elle impliquerait des pertes importantes pour l'O.C.D.E. (au moins 2 à 3 fois supérieures à celles que l'on calculait précédemment avec les fonctions tirées de GREEN). En outre, la flexibilité permise par un marché de permis de polluer et par l'application conjointe n'abaisserait que modérément les coûts par rapport aux simulations précédentes. Cette moindre efficacité provient d'une plus grande homogénéité des coûts régionaux dans le modèle MR (au moins pour l'année 2000). Par exemple, l'échange de permis d'émission entre les pays de l'O.C.D.E. diminuerait le coût collectif de la stabilisation de seulement 0,2 pour-cent environ, par rapport à la situation où chaque pays de l'O.C.D.E. tiendrait individuellement son engagement (avec le calibrage tiré de GREEN, le gain entre le scénario n°1 et le scénario n°2 avoisinait 30 pour-cent). Dans l'hypothèse d'un système d'application conjointe global, le transfert de la dépollution vers les pays non-membres de l'O.C.D.E. équivaudrait à 22 pour-cent de la dépollution mondiale seulement, contre presque 70 pour-cent dans les simulations précédentes. L'enseignement principal à tirer de cette spécification est qu'elle rend encore plus improbable la mise œuvre effective des engagements de l'O.C.D.E.

A l'inverse, les fonctions de coût déduites de Nordhaus & Yang (1996) (voir l'annexe 7.3) font état d'une facilité relative à réduire les émissions. Ainsi, la politique coopérative, consistant en une taxe globale de 6,19 dollars par tonne, réduirait l'émission mondiale de plus de 11 pour-cent en 2000. Avec cette configuration, l'initiative de l'O.C.D.E. pour stabiliser ses émissions serait donc insuffisante, puisque le taux de dépollution serait d'environ 5 pour-cent seulement. Le coût économique de la stabilisation serait plus faible que dans le cas des fonctions calibrées sur GREEN (4 à 5 fois moindre pour le scénario n°1). L'instauration d'un marché des permis d'émission et de l'application conjointe permettrait des gains d'efficacité

conséquents. Dans le scénario n°4, les efforts de réduction des émissions seraient massivement transférés vers les pays non-membres de l’O.C.D.E. (principalement vers le “reste du monde”). Ces derniers produiraient alors les deux tiers de la dépollution mondiale. L’O.C.D.E. dans son ensemble gagnerait à appliquer cette politique, tandis que le gain mondial serait proche de celui que l’on déterminait ci-dessus.

7.3 - Conclusion

Les négociations sur le climat s’insèrent dans un contexte historique plus large de prolifération des traités multilatéraux sur l’environnement. Pour autant, ce climat favorable n’est pas un gage de réussite ! D’ailleurs, depuis le Sommet de la Terre, qui s’est tenu à Rio de Janeiro en 1992, les négociations piétinent et les progrès sont infimes. A l’issue de cette Conférence internationale, marquée par la ratification de la Convention-cadre sur les changements climatiques, deux catégories de pays, différenciées par les engagements souscrits, se sont faites jour. D’un côté, il y a les pays de l’O.C.D.E., historiquement responsables de la majeure partie de l’effet de serre additionnel, à qui la Convention assigne de stabiliser leurs rejets de gaz à effet de serre et d’aider les pays en développement. De l’autre, le reste du monde, qui revendique son droit au développement, adopte une attitude passive, en attendant d’observer les efforts consentis par les pays riches.

Bien que ce traité ait valeur légale (mais, cela a-t-il un sens, sachant qu’il reste tributaire de la bonne volonté des pays signataires ?), on doit déplorer qu’il n’ait pas été suivi d’effets. Dans leur ensemble, les pays développés n’ont rien tenté pour infléchir leurs émissions de gaz à effet de serre, alors qu’ils s’y étaient engagés, sous le prétexte d’un manque de flexibilité de l’accord. Leurs revendications concernent l’aménagement d’un marché de permis d’émission négociables et celui d’un système d’application conjointe, leur permettant de financer à l’étranger des projets de dépollution peu coûteux et d’en garder le bénéfice, sous la forme d’un assouplissement de leurs engagements.

Ces critiques, formulées par quelques pays de l’O.C.D.E., sont-elles fondées ? Telle est la question que nous posons et à laquelle nous répondons, au moyen d’une application numérique calibrée sur les résultats des chapitres 2, 3 et 7. Nos calculs établissent clairement que, bien que l’effort de dépollution mondial réclamé collectivement par l’ensemble des signataires de la Convention soit raisonnable, sa répartition, sous la forme de quotas d’émission individuels, laisse à désirer. Dès lors, vu la faible place réservée aux instruments économiques dans le traité, ce défaut devient un argument parfaitement recevable, que certains pays développés n’hésitent d’ailleurs pas à brandir. De fait, en l’état actuel, le respect stricto sensu des engagements souscrits serait inefficace et les pays développés en supporterait tous les inconvénients.

Par contre, les aménagements du traité réclamés par ces pays, sans lèsé a priori les pays en développement, redistribuerait les efforts de dépollution de manière plus rationnelle. Il semblerait même, à en croire les estimations de GREEN (Oliveira-Martins & alli, 1993), à partir desquelles nous paramètrons nos fonctions de coût, et les résultats de Nordhaus & Yang (1996), selon lesquels le bénéfice mondial de la lutte contre l’effet de serre serait de 6,19 dollars par tonne de carbone en 2000, que l’application de la Convention ainsi redéfinie serait une mesure proche de l’optimum, mais impliquant une forte redistribution des bénéfices vers les pays en développement.

Annexe 7.1 - Calibrage des fonction de coût : un exemple

Le calibrage des fonctions de coût utilise les résultats des modèles d'équilibre général pour l'année 2000. La méthode est la même que celle employée par Tahvonen (1994), Nordhaus (1992b) et (1993), et Nordhaus & Yang (1996). L'exemple suivant illustre la démarche suivie et conduit au paramétrage de la fonction de coût de la Communauté européenne à partir des données de GREEN.

Par hypothèse, la fonction de coût est de la forme $C(q) = c \cdot q^d$. Le coût marginal est donc $C'(q) = c \cdot d \cdot q^{d-1}$. Comme les taxes sur les émissions de carbone de GREEN expriment les coûts marginaux de dépollution, cette relation peut être estimée par la méthode des moindres carrés ordinaires, en remarquant que $\ln(C'(q)) = \ln(c \cdot d) + (d-1) \cdot \ln(q)$. Nous utilisons les quatre points correspondant aux quatre scénarios étudiés par le modèle

Tableau 1 : Ajustement de la fonction de coût de la C.E. à partir de GREEN

	Emission (tC)	Taxe T (\$/tC)	Dépollution q (tC)	$\ln(T)$	$\ln(q)$	$\ln(T)^2$	$\ln(q)^2$	$\ln(T) \cdot \ln(q)$
Stabilisation	8,13E+08	59	7,10E+07	4,08	18,08	16,63	326,82	73,71
Scénario 1%	8,00E+08	56	8,40E+07	4,03	18,25	16,20	332,93	73,45
Scénario 2%	7,24E+08	186	1,60E+08	5,23	18,89	27,31	356,86	98,72
Scénario 3%	6,54E+08	492	2,30E+08	6,20	19,25	38,42	370,70	119,34
Pol. inchangée	8,84E+08		Moyenne :	4,88	18,62	24,64	346,83	91,31
d-1 = (91,31 - 4,88.18,6) / (346,83 - (18,62)^2) =				1,854				d = 2,853939
ln (c.d) = 4,88 - (d - 1) . 18,62 =				-29,633				R ² = 0,97
								c = 4,731E-14

Si l'on exprime la dépollution en GtC et le coût en milliards de dollars, le paramètre c doit être multiplié par $(10^9)^{d-1}$. On obtient alors $c = 2292,96$.

La fonction de coût s'écrit donc $C(q) = 2292,96 \cdot q_i^{2,85}$.

Annexe 7.2 - Calibrage du jeu à partir de MR (1993)

Tableau 1 : Equilibre coopératif et équilibre de Nash en 2000

Pays	Nash		Coopération	
	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)
Etats-Unis	0,008	0,008	0,033	-0,040
Autres OCDE	0,007	0,014	0,027	0,005
Ex-URSS	0,000	0,002	0,000	0,006
Chine	0,000	0,001	0,000	0,005
Reste du monde	0,000	0,063	0,005	0,256
Total	0,015	0,087	0,065	0,232

Note : Amélioration du bien-être par rapport à la solution de marché.

Tableau 2 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E.

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répartition optimale des émissions dans l'OCDE (GtC) (b)	Gains (milliards de \$) (c)	
				scén. n°1 Quotas non négociables	scén. n°2 Permis négociables
Etats-Unis	1,649	1,430	1,423	-9,014	-9,002
Autres OCDE	1,640	1,375	1,381	-12,957	-12,936
Ex-URSS	1,184	Nash	Nash	0,047	0,047
Chine	0,754	Nash	Nash	0,033	0,033
Reste du Monde	1,743	Nash	Nash	1,956	1,956
Total	6,970	6,486	6,485	-19,935	-19,902

(a) : Manne (1993) (projections des émissions de dioxyde de carbone) ;

(b) : Le prix des permis d'émission serait de 111,4 dollars par tonne ;

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash.

Tableau 3 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E. et application conjointe

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répart. opt. des émiss°		Gains (milliards de \$) (c)	
			scén. n°3 Ex-URSS (GtC) (b)	scén. n°4 Monde (GtC) (b)	scén. n°3 Ex URSS	scén. n°4 Monde
Etats-Unis	1,649	1,430	1,435	1,468	-9,000	-8,478
Autres OCDE	1,640	1,375	1,398	1,441	-12,783	-11,702
Ex-URSS	1,184	Nash	1,156	1,170	0,804	0,331
Chine	0,754	Nash	Nash	0,748	0,033	0,150
Reste du monde	1,743	Nash	Nash	1,658	1,956	5,137
Total	6,970	6,486	6,486	6,486	-18,991	-14,563

(a) : Manne (1993) (projections des émissions de dioxyde de carbone) ;

(b) : Le prix des permis d'émission et la subvention seraient de : 102,4 dollars par tonne dans le cas scénario n°3 ; 79,3 dollars par tonne dans le scénario n°4.

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash.

Annexe 7.3 - Calibrage du jeu à partir de RICE (1996)

Tableau 1 : Equilibre coopératif et équilibre de Nash en 2000

Pays	Nash		Coopération	
	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)	Dépollution (GtC)	Gain (milliards de dollars)
Etats-Unis	0,040	0,065	0,132	0,234
Europe	0,023	0,092	0,065	0,551
Japon	0,006	0,037	0,027	0,204
Ex-URSS	0,019	0,011	0,165	-0,274
Chine	0,014	0,008	0,147	-0,260
Reste du monde	0,013	0,475	0,259	2,760
Total	0,114	0,688	0,795	3,216

Note : Améliorations du bien être par rapport à la solution de marché.

Tableau 2 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E.

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répartition optimale des émissions dans l'OCDE (GtC) (b)	Gains (milliards de \$) (c)	
				scén. n°1 Quotas non négociables	scén. n°2 Permis négociables
Etats-Unis	1,497	1,339	1,311	-0,307	-0,280
Europe	0,884	0,813	0,791	0,045	0,083
Japon	0,417	0,329	0,379	-1,667	-0,635
Ex-URSS	1,221	Nash	Nash	0,025	0,025
Chine	0,875	Nash	Nash	0,017	0,017
Reste du Monde	2,177	Nash	Nash	1,036	1,036
Total	7,071	6,709	6,709	-0,851	0,246

(a) : Oliveira-Martins & alli (1993) (projections des émissions de dioxyde de carbone) ;

(b) : Le prix des permis d'émission serait de 11,2 dollars par tonne ;

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash.

Tableau 3 : Stabilisation des émissions de l'O.C.D.E. et application conjointe

Pays	Projection des émissions en 2000 (GtC) (a)	Quota d'émission 1990 (GtC)	Répart. opt. des émiss°		Gains (milliards de \$) (c)	
			scén. n°3 Ex-URSS (GtC) (b)	scén. n°4 Monde (GtC) (b)	scén. n°3 Ex URSS	scén. n°4 Monde
Etats-Unis	1,497	1,339	1,381	1,428	-0,204	0,021
Europe	0,884	0,813	0,825	0,848	0,068	0,156
Japon	0,417	0,329	0,394	0,404	-0,231	-0,014
Ex-URSS	1,221	Nash	1,084	1,149	0,323	0,057
Chine	0,875	Nash	Nash	0,812	0,017	0,049
Reste du monde	2,177	Nash	Nash	2,068	1,036	1,104
Total	7,071	6,709	6,709	6,709	1,008	1,373

(a) : Oliveira-Martins & alli (1993) (projections des émissions de dioxyde de carbone) ;

(b) : Le prix des permis d'émission et la subvention seraient de : 4,3 dollars par tonne dans le scénario n°3 ; 1,2 dollars par tonne dans le scénario n°4.

(c) : Gains par rapport à l'équilibre de Nash.

Chapitre 8

Coalitions

En schématisant, la Convention-cadre sur les changements climatiques oppose deux camps. D'un côté, les pays de l'O.C.D.E. promettent de réduire leurs émissions (même s'ils tardent à mettre ce plan à exécution, cet engagement est réel). De l'autre, le reste du monde se donne un délai avant d'agir ou, dans le meilleur des cas, dépollue à condition de recevoir une aide des pays développés.

Pour partie, des raisons extra-économiques ont très certainement guidé les négociations et expliquent l'équilibre actuel du traité. Par exemple, la responsabilité historique des pays développés dans le renforcement de l'effet de serre pèse lourdement dans l'attitude des pays du tiers monde. De même, les inégalités de développement entre les deux régions orientent de façon non négligeable les négociations. Le poids de ces arguments est évident ; il ne sera donc pas analysé dans ce chapitre.

Notre préoccupation présente est ailleurs. Outre les raisons historique et éthique susdites, il semble raisonnable de penser que des déterminants économiques interviennent en parallèle et renforcent la configuration bipartite de la Convention. La question que nous posons ici s'énonce ainsi de la façon suivante : de quelle manière les différences régionales face aux bouleversements climatiques, d'une part, et en matière de coût de la limitation des émissions de carbone, d'autre part, organisent-elles les tractactions internationales ?

La notion de coalition spontanée (“self-enforced” en anglais)¹, appliquée par d'Aspremont et Gabszewics (1986) à la formation de cartels, puis adaptée par Barrett (1990), (1991), (1992) et (1994) à l'analyse des négociations internationales sur l'environnement, propose une piste de recherche fructueuse. L'idée commune à cette littérature est d'isoler des

¹ - Nous traduirons aussi par “auto-réalisatrice”.

ententes entre des joueurs qui se forment d'elles-mêmes, par le truchement des intérêts individuels des participants. Appliquée aux négociations sur le climat, elle pourrait nous aider à comprendre pourquoi les pays de l'O.C.D.E. acceptent d'endosser seuls la lutte contre l'effet de serre et tolèrent, parallèlement à leurs engagements, que le reste du monde se comporte en passager clandestin.

Dans la première section, nous définirons plus précisément la notion de coalition spontanée. Nous verrons que deux conditions suffisent à les identifier. Nous discuterons ensuite des règles de fonctionnement interne de la coalition : définition de la dépollution cible et des objectifs individuels, répartition des gains et conditions d'accès d'un nouveau candidat.

Dans la section suivante, nous proposerons une synthèse courte des deux études qui nous ont inspiré ce chapitre. La première est le fait de Barrett (1994). Elle postule une absence de redistribution des gains entre les membres de la coalition et un grand nombre de pays identiques. La seconde est le fait de Botteon & Carraro (1995). Cette étude s'applique au contraire à un petit nombre de pays différents avec redistribution des gains de l'accord.

Dans la troisième section, nous remarquerons l'inconvénient majeur de l'hypothèse d'identité des pays posée par Barrett. Nous prolongerons son travail en proposant une réflexion sur les coalitions spontanées dans un monde composé d'un grand nombre de pays différents. L'avantage de ce nouveau jeu d'hypothèses réside dans la possibilité d'identifier les pays susceptibles de s'entendre. Ainsi, nous montrerons que, si les transferts latéraux ne sont pas autorisés et si l'entrée dans l'accord est libre, les membres de la coalition seront des pays définis par un grand dommage marginal de la pollution et par un coût marginal de réduction des émissions fortement croissant. Nous remarquerons que ce profil dépeint assez bien certains pays de l'O.C.D.E.

Pour finir, nous reprendrons le travail de Botteon & Carraro (1995) en utilisant un calibrage moins critiquable des fonctions de dommage. Nous étudierons les coalitions auto-réalisables avec redistribution des gains entre les membres selon le vecteur de Shapley (1974). Cette simulation mettra en évidence les possibilités d'ententes mutuellement bénéfiques et stables

entre des pays soucieux d'environnement (ceux dont le dommage marginal est fort) et des pays capables de réduire leur émission sans accroître sensiblement leur coût marginal de dépollution (ceux dont le coût marginal est relativement plat). La condition pour que de tels accords se concrétisent est que les premiers offrent une aide financière aux seconds.

8.1 - Coalition : définition et fonctionnement

Le concept de coalition regroupe toutes les formes possibles d'entente entre des agents économiques. A partir d'un ensemble de N joueurs, il y a $2^N - 1$ coalitions possibles, en incluant les coalitions réduites à un seul joueur. Deux règles simples permettent d'éliminer les ententes qui n'ont aucune chance de se former.

La règle de profitabilité (Carraro et Siniscalco, 1995) prend acte du fait que l'adhésion des pays à une coalition repose sur le volontariat. D'un point de vue économique, un pays décide de participer à une entente si son bien-être au sein de celle-ci dépasse son paiement non coopératif.

Cependant, beaucoup de coalitions vérifient cette propriété sans avoir un réel intérêt pratique, à commencer par la coopération universelle : le bien-être collectif est maximum si tous les joueurs coopèrent ; il existe donc toujours une imputation² telle que chacun voit sa situation s'améliorer par rapport à l'équilibre de Nash. La coopération totale remplit donc la condition de profitabilité. Mais, comme les pays sont inciter à resquiller, donc à quitter cet état, la coalition totale n'existera pas dans les faits.

La règle de stabilité élimine la tentation du resquillage (D'Aspremont et Gabszewics, 1986 ; Barrett, 1994 ; Botteon et Carraro, 1995). Elle est remplie lorsque les membres de la coalition gagnent plus à rester qu'à quitter l'entente (condition de stabilité interne) et lorsque les non-membres ne désirent pas adhérer (condition de stabilité externe).

² - « Une imputation est une répartition du bénéfice total ... que la coalition de tous les agents peut obtenir », Moulin (1981, p. 179)

Les conditions précédentes sont reprises formellement dans la définition des coalitions spontanées suivante.

Définition 8.1 : Soit I une coalition quelconque,

Π_i désignant le bien-être du joueur i lorsqu'il est membre de la coalition et Π_i , son bien-être dans le cas contraire, la coalition I est spontanée si :

$$\Pi_i(I) \geq \Pi_i(\emptyset), \quad \forall i \in I, \quad (\text{Profitabilité})$$

$$\Pi_i(I - \{i\}) \leq \Pi_i(I), \quad \forall i \in I, \quad (\text{Stabilité interne})$$

$$\Pi_i(I + \{i\}) \leq \Pi_i(I), \quad \forall i \notin I. \quad (\text{Stabilité externe})$$

La définition 8.1 sert à isoler des coalitions qui ont la propriété intéressante de se constituer “naturellement”, par interaction entre les intérêts des pays. Mais, elle ne donne pas d’informations sur leur fonctionnement interne.

Les membres d’une coalition adhèrent à des principes et adoptent « des stratégies jointes afin de partager un paiement commun » (Cochinard, 1995, p. 636). Dans le jeu de l’effet de serre, le groupe décide l’émission cible, la part de chacun dans cet effort collectif et la redistribution des bénéfices. Eventuellement, les parties fixent une règle régissant les conditions d’adhésion d’un nouveau membre.

D’un point de vue normatif, la dépollution globale et les contributions individuelles reposent sur la recherche de l’optimum collectif :

- la dépollution globale maximise le bien-être des signataires de l’accord, la réaction des autres pays étant donné;
- la répartition des efforts entre les membres égalise les coûts marginaux de dépollution.

Pour ce qui est de la distribution des gains, un découpage logique s’inspire de la dichotomie entre les jeux avec et sans transferts latéraux. Dans le premier cas, les pays signataires perçoivent le paiement primaire de leur adhésion, proportionnel à leurs fonctions de bénéfice

et de coût uniquement. Dans l'autre cas, la somme des paiements primaires est mise en commun, puis redistribuée. La théorie des jeux met à notre disposition plusieurs règles de répartition des gains : la valeur de Shapley, le nucleolus, le cœur...

La procédure d'adhésion se résume, pour nous, à deux extrêmes : l'entrée dans la coalition est libre ou ne l'est pas. La condition de stabilité externe, qui implique que les coalitions attractives ne sont pas solutions du jeu, s'interprète comme une règle de libre adhésion : partant d'une coalition quelconque, vérifiant uniquement les conditions de profitabilité et de stabilité interne, certains pays se déclarent candidats ; pour s'approcher de la solution, il faut les laisser entrer, même si leur adhésion porte atteinte à un ou plusieurs membres originels (il y a donc bien libre entrée puisque le nouvel arrivant se joint au groupe en dépit de sa volonté) ; pour finir, les pays lésés par cette intrusion renient l'accord et une nouvelle coalition apparaît.

Lorsque les pays sont identiques, la règle de libre entrée s'applique de plein droit. D'une part, l'exercice de son droit d'entrée par un candidat ne porte jamais préjudice aux signataires originels (sinon, par symétrie, le pays se lèse lui-même). D'autre part, la stabilité externe de l'accord signifie, dans ce cas, qu'il a atteint sa taille maximale. Par contre, on peut s'interroger sur la pertinence de la condition de stabilité externe en conditions asymétriques. En effet, dans ce cas, les joueurs peuvent ressentir le désir de former des coalitions regroupant des participants aux caractéristiques proches et d'interdire l'entrée aux autres pays.

8.2 - Accords Internationaux sur l'Environnement

Barrett (1990), (1991) et (1994) fut l'un des premiers à aborder le sujet de la formation endogène d'Accords Internationaux sur l'Environnement (International Environmental Agreements). L'A.I.E. est spontané. Il définit un niveau de dépollution maximisant le bien-être commun des signataires, sachant la réaction des free riders. Ceux-ci maximisent leur bénéfice net individuel en fonction de la dépollution de la coalition.

L'analyse de Barrett (1994) repose sur les hypothèses suivantes : les pays sont identiques ; l'information est complète et savoir commun ; les efforts de dépollution sont observables sans coût et instantanément ; le polluant n'est pas cumulatif ; la structure de coalition retenue oppose une coalition à des free riders (autrement dit, les pays non-membres sont censés ne pas s'organiser en coalition concurrente) ; aucun transfert n'est offert.

L'hypothèse d'identité des pays facilite l'étude des négociations multinationales à grande échelle (Protocole de Montréal ; Conférence de Rio). En utilisant différentes spécifications des fonctions de bénéfice $B(Q)$ et de coût $C(q)$ de la dépollution, Barrett (1994) parvient aux résultats suivants :

- Lorsque le bénéfice marginal et le coût marginal sont linéaires, l'A.I.E. existe toujours. Le nombre des signataires est grand quand le rapport des pentes des courbes de coût marginal et de bénéfice marginal est petit (voir le tableau 8.1). Or, quand ce rapport est petit, la différence entre l'équilibre de Nash et la coopération totale est ténue. Selon Barrett, ce résultat rend compte du fait que les pays harmonisent plus volontiers leur politique quand cela modifie peu leur comportement ;
- Lorsque le bénéfice marginal est constant et le coût marginal linéaire, l'A.I.E. rassemble 2 pays quand le monde n'en comporte que 2, 3 sinon³ ;
- Lorsque le bénéfice marginal est constant et le coût marginal logarithmique, l'A.I.E. réunit 2 pays dans tous les cas ;
- Lorsque le bénéfice marginal est linéaire et le coût marginal constant, aucun A.I.E. n'existe.

Tableau 8.1 : Nombre de membres de l'A.I.E.

b \ c	0,01	0,1	1	10	100
0,01	3	3	2	2	2
0,1	11	3	3	2	2
1	51	11	3	3	2
10	92	51	11	3	3
100	100	92	51	11	3

³ - Il s'agit d'un cas particulier de la spécification utilisée dans le chapitre 7 (lorsque d_i est égale à 2).

Notes :
 Il y a 100 pays au total.
 La spécification est :
 $B(Q) = b \cdot (100 \cdot Q - Q^2 / 2)$ et $C(q) = c \cdot q^2 / 2$.
 Source : Barrett (1994)

Botteon & Carraro (1995) analysent la formation des coalitions spontanées dans le cas asymétrique et introduisent des transferts latéraux entre les pays signataires de l'A.I.E. ⁴. La distribution des gains résulte soit d'une procédure de négociation "à la Nash", soit d'un partage du pouvoir inspiré de la valeur de Shapley. Leur modèle traite des négociations internationales sur le climat. Leur spécification pose un dommage marginal constant et un coût marginal linéaire. Botteon & Carraro considèrent 5 pays ou régions : le Japon, les Etats-Unis et le Canada, la Communauté européenne, l'Europe de l'est et la Russie, la Chine et l'Inde. Ils calibrent leur modèle sur des données tirées de Musgrave (1994). Ils montrent que : les coalitions stables ne réunissent jamais plus de 3 membres, quelle que soit la méthode de partage des gains ; le pays le plus vulnérable au réchauffement climatique participe à toutes les coalitions.

8.3 - Profil des signataires

8.3.1 - Aucuns transferts latéraux

Avec l'hypothèse d'identité des pays énoncée par Barrett (1994), la question du profil des signataires de l'A.I.E. n'a pas de sens. De ce fait, l'intérêt pratique de son étude se limite à la détermination de la taille d'un accord stable entre des individus moyens représentatifs d'une réalité économique donnée.

Plusieurs raisons portent à croire qu'il serait plus utile de connaître le profil type des pays susceptibles de former de tels accords. D'une part, la taille de la coalition stable est très sensible à la spécification (voir ci-dessus), si bien qu'il est difficile de tirer des implications

⁴ - Lorsque tous les pays sont identiques, les transferts sont nuls. Il est donc nécessaire de lever l'hypothèse de symétrie pour analyser la question de la redistribution des gains.

générales du travail de Barrett. D'autre part, dans un monde asymétrique, l'efficacité d'une coalition dépendra, certes, de sa dimension mais plus encore de l'identité des pays qui la composent.

Ainsi, Blackhurst & Subramanian (1992) sont enclins à croire que l'asymétrie améliore les chances de résolution du problème des ressources communes. Olson (1971) va dans le même sens en constatant que, dans des conditions très asymétriques, les pays les plus importants peuvent conclure un accord qui résout l'essentiel du problème.

8.3.1.1 - Argumentation

La Convention-cadre sur les changements climatiques a vocation à devenir universelle. De ce fait, l'adhésion au traité et le passage d'un statut à l'autre, au sein de ce dernier, doivent être libres. Notamment, un pays non tenu de réduire ses émissions doit pouvoir rejoindre le groupe des annexes I et II à tout moment ; cette possibilité est prévue par la Convention (Article 4, paragraphe 2, alinéa g). Ceci justifie que nous étudions un A.I.E. dont l'adhésion est libre.

La condition de libre entrée a une influence déterminante dans la sélection des participants d'une coalition. Au titre de l'effort de dépollution supplémentaire qui accompagne son entrée dans l'entente, tout arrivant se trouve légitimement investi d'un certain pouvoir, qu'il exerce pour influencer les décisions de ses partenaires. Principalement, il revendique un renforcement de leurs politiques d'environnement et justifie ce geste en arguant la perte qu'il subit en acceptant de coopérer et le profit qu'ils en tirent.

L'adhésion d'un nouveau pays à un A.I.E. se traduit donc par une réciprocité : l'entrant internalise les dommages des membres originels ; en contrepartie, chacun d'entre eux internalise le dommage de leur nouveau partenaire. Cet échange, s'il est équitable, renforce l'A.I.E. et lui permet de croître. Par contre, lorsque les pays sont trop différents, la réciprocité devient inéquitable, au point de susciter le départ des membres originels ou d'empêcher l'entrée du pays candidat.

Les deux exemples suivants, bien que caricaturaux, montrent de quelle manière cette réciprocité inégale annihile les désirs de participation à l'A.I.E. de certains types de pays.

Exemple 8.1 :

Supposons que :

- les membres de l'A.I.E. soient en mesure de dépolluer à un coût marginal constant ou faiblement croissant ;
- les pays non-membres aient, au contraire, un coût marginal infiniment pentu ou très pentu.

Dans ces circonstances, les pays extérieurs souhaitent intégrer l'entente, puisqu'ils bénéficient d'une forte baisse de la pollution de la part de l'A.I.E., sans rien faire de plus (ou presque). Evidemment, puisqu'il n'y a aucune réciprocité, ceci n'est pas du goût des membres originels, qui choisissent soit de partir, soit d'empêcher les pays en question d'adhérer, ce qui est exclu par hypothèse. En conclusion, et en élargissant à des oppositions moins extrêmes, cet exemple suggère que les pays les plus aptes à dépolluer éviteront d'adhérer à l'A.I.E., de peur qu'on leur réclame un effort démesuré, car assortie d'une compensation insuffisante.

Exemple 8.2 :

Supposons que :

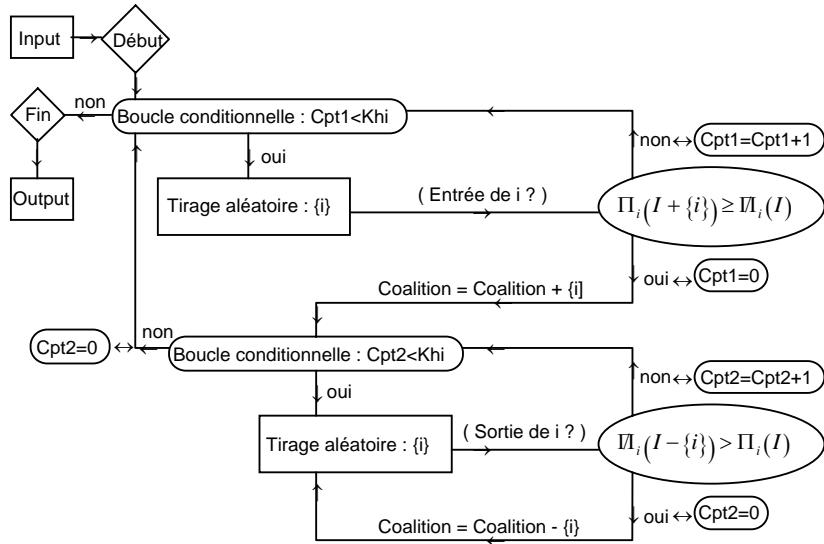
- les membres de l'A.I.E. soient peu sensibles à la pollution ;
- les pays non-membres soient, au contraire, très vulnérables.

Là encore, les pays extérieurs choisissent d'adhérer car ils obligent les autres à internaliser un dommage très important, donc à accroître fortement leur dépollution, en modifiant leur propre politique dans des proportions bien moindres. Les autres pays sont, à nouveau, les perdants. En conséquence, les pays les moins soucieux de préserver l'environnement, c'est-à-dire ceux qui sont le plus épargnés par la pollution, ne participeront pas à un A.I.E. Ce résultat semble beaucoup moins étonnant que le précédent.

8.3.1.2 - Vérification

Les arguments présentés ci-dessus sont surtout intuitifs et une démonstration plus rigoureuse serait souhaitable. Nous ne sommes malheureusement pas parvenus à la construire. Pour pallier cette lacune, les allégations précédentes ont été testées au moyen d'un algorithme de résolution simple⁵. Nous le décrivons dans le schéma 8.1.

Schéma 8.1 : Algorithme de résolution



L'input de cet algorithme est une coalition quelconque, les fonctions de bénéfice et de coût des pays et un paramètre noté Khi. L'output de cet algorithme est une coalition spontanée.

L'algorithme utilise deux boucles conditionnelles. La première gère l'entrée des pays dans la coalition, l'autre leur départ. Les pays proposés à l'entrée ou à la sortie font l'objet d'un tirage aléatoire, une file d'attente dont l'ordre serait exogène et immuable risquant d'influencer le résultat final.

Le déroulement concret de l'algorithme est le suivant. Initialement quelconque, la coalition se remplit au fur et à mesure que des pays sont simultanément proposés à l'entrée par le tirage

⁵ - Le programme Basic conçu pour “faire tourner” cet algorithme est fourni et expliqué dans l'appendice 4.

aléatoire et candidats à l'adhésion si la condition $\Pi_i(I + \{i\}) \geq \Pi_i(I)$ est satisfaite. Ceci est le résultat de la première boucle conditionnelle.

A chaque nouvelle adhésion, l'équilibre interne des intérêts des signataires est potentiellement bouleversé. La boucle conditionnelle des sorties prend alors le relais. Elle recherche les candidats au départ selon une méthode identique. Cette boucle est stoppée lorsque les pays tirés au hasard ne sont pas candidats au départ pendant Khi tirages successifs. Alors, les sorties sont stabilisées et on retourne dans la boucle des entrées.

A nouveau, si les pays proposés de manière aléatoire sont candidats à l'adhésion, l'opération précédente est répétée. Dans le cas contraire, l'algorithme est stoppé lorsque les pays tirés refusent d'entrer pendant Khi tirages successifs. A condition que Khi soit suffisamment grand, on obtient une coalition stable puisque plus aucun pays ne souhaite entrer ni sortir.

Nous avons employé cet algorithme pour plusieurs spécifications utilisées dans la littérature (bénéfice et coût marginaux linéaires ; bénéfice marginal constant et coût marginal linéaire ; bénéfice marginal constant et coût marginal logarithmique). D'une manière générale, nous supposons que le monde comportait 5 régions différentes, composées de N pays identiques chacune, et que les paramètres régionaux se distribuaient conformément au tableau 8.2 : une région moyenne, c'est-à-dire la région n°3, autour de laquelle gravitent les quatre autres régions.

Tableau 8.2 : Paramètres des fonctions de bénéfice et de coût

$t \in [0,1]$		c_i		
		$(1-t).c$	c	$(1+t).c$
b_i	$(1-t).b$	région n°1		région n°2
	b		région n°3	
	$(1+t).b$	région n°4		région n°5

Notes : les spécifications testées sont (Barrett, 1994) :

$$B_i(Q) = b_i \cdot (aQ - Q^2 / 2) \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot q_i^2 / 2 ;$$

$$B_i(Q) = b_i \cdot Q \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot q_i^2 / 2 ;$$

$$B_i(Q) = b_i \cdot Q \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot \left[(1 - q_i) \cdot \ln(1 - q_i) + q_i \right].$$

Nous n'allons évidemment pas reproduire ici le détail des résultats obtenus. D'une part, cela n'enrichirait en rien la discussion. D'autre part, les possibilités, i.e. le choix des paramètres et le nombre de pays par région, sont infinies et il est impossible d'étudier tous les cas de figure.

Néanmoins, nous avons réalisé un très grand nombre de tests. Il semble acquis que, quelle que soit la spécification, la coalition stable regroupe systématiquement des pays de la région n°5. Or, cette région est celle où la pente du coût marginal est la plus forte et où le bénéfice marginal est le plus grand. Ceci corrobore donc l'argumentation générale de la sous-section 8.3.1.1.

En outre, nos simulations généralisent certains résultats de Barrett : lorsque le bénéfice marginal est constant et le coût marginal est linéaire, l'A.I.E. rassemble 2 pays quand le monde n'en comporte que 2, 3 sinon ; lorsque le bénéfice marginal est constant et le coût marginal logarithmique, l'A.I.E. possède 2 membres dans tous les cas. Par contre, le tableau 8.1 est modifié par l'asymétrie.

8.3.1.3- Réglementation des adhésions

La libre entrée n'est pas toujours de rigueur dans les organisations internationales. De fait, si une coalition préexiste à l'intention d'adhésion d'un pays donné, il semble impensable de soutenir que les signataires originels toléreront son entrée effective si elle va à l'encontre de leur intérêt ⁶.

⁶ - Ce paradoxe n'est qu'apparent : si la règle d'adhésion libre est clairement fixée dès le début, la coalition considérée n'existera jamais puisque les pays mènent un raisonnement prospectif : « Mon adhésion, apparemment rentable, ne l'est plus si je tiens compte des candidatures qu'elle suscite. Donc, je m'abstiens. ».

L'inconvénient de l'abandon de la condition de stabilité externe est la multiplication du nombre de solutions, sans qu'il soit possible d'en privilégier une parmi elles. Sans transferts latéraux, nous savons seulement que la cohésion du groupe nécessite une relative homogénéité des participants, sans quoi certains risquent de perdre. Il s'ensuit qu'il existe au moins autant de coalitions auto-réalisables que de communautés d'intérêts.

Toutefois, bien que toutes puissent se concrétiser, il semblerait naturel que ce soit la plus efficace d'entre elles qui émerge finalement. En effet, en information complète, les autres pays prévoient sa formation et anticipent les gains qu'ils en retireront en tant que free riders. Dans cette perspective, ces pays préfèrent s'abstenir de participer à une coalition et attendent que la première se constitue.

Or, à nombre de signataires identiques, la coalition homogène la plus efficace réunit nécessairement les pays les plus vulnérables à la pollution, i.e. ceux dont le bénéfice marginal de la dépollution est le plus élevé, et les pays qui sont en mesure de renforcer fortement leur politique environnementale sans accroître trop fortement leur coût marginal de dépollution, i.e. ceux dont la courbe de coût marginal est peu pentue. Avec la configuration décrite dans le tableau 8.2, l'A.I.E. en question émanerait de la région n°4.

8.3.1.4 - Parallèle avec les négociations sur le climat

La Convention-cadre sur les changements climatiques a été signée par 165 Etats. Mais, le large consensus international obtenu reflète un accord de principe uniquement. Concernant les engagements, le traité, dans sa forme actuelle, oppose une coalition formée par les pays des annexes I et II, qui annoncent explicitement leur intention de réduire leurs rejets de gaz à effet de serre, aux pays en développement, qui attendent des premiers une action vigoureuse et une aide financière suffisante pour couvrir les coûts qu'ils encourraient en réduisant leurs propres émissions. Sans tirer de conclusions hâtives, il est intéressant de confronter cette configuration aux résultats précédents.

En l'absence de transferts et en régime de libre adhésion, les pays de l'annexe I et II ont un profil qui fait d'eux, selon nos conclusions, les candidats naturels à former une coalition : à

court terme, le bénéfice par tonne de carbone évitée est plus grand pour ces pays (Nordhaus & Yang, 1996) ; certains d'entre eux ont déjà exploité l'essentiel de leurs gisements d'économie d'énergie (du fait des politiques visant à réduire leur dépendance énergétique, menées après les chocs pétroliers), si bien que toute limitation supplémentaire de leurs émissions accroît sensiblement leur coût marginal de dépollution (voir le chapitre 2).

Parmi les autres signataires de l'accord, non listés dans les annexes I et II, quelques-uns pourraient réduire beaucoup plus facilement leurs émissions. Cependant, un geste dans ce sens, même s'il est dans leur intérêt d'atténuer les bouleversements climatiques prévus, risquerait de les placer dans une situation délicate. Inévitablement, les autres pays exigeraient de leur part une action vigoureuse, en mettant en avant précisément l'inégalité des coûts de dépollution. Ainsi, quelle parade certains pays pourraient-ils trouver à l'argument confrontant les lourdes taxes sur l'énergie, imposées par certains pays développés, aux subventions énergétiques importantes qu'ils appliquent ?

8.3.2 - Partage des gains

La sous-section précédente était consacrée à l'identification des signataires d'un A.I.E. en l'absence de transferts latéraux. La coalition obtenue peut être vue comme une première étape non contraignante vers la coopération. Cependant, à terme, l'efficacité de l'action internationale ne s'améliorera que si des transferts latéraux sont offerts. Un système de redistribution permet, en effet, d'attirer les pays capables de réduire leurs émissions à moindre coût.

Dans cette section, nous étudions les coalitions auto-réalisables avec transferts en reprenant Botteon & Carraro (1995). L'amélioration que nous apportons à leur travail se limite au choix d'un calibrage plus représentatif de la position moyenne de la littérature. Tant du point de vue des bénéfices par tonne de carbone évitée que de celui du classement des régions en fonction de ces données, leur calibrage, tiré de Musgrave (1994), diffère de la plupart des évaluations disponibles et s'appuie sur un raisonnement contestable : le dommage climatique provient d'un accroissement uniforme du taux de mortalité de 0,2 individu par million d'habitants ; le

dommage monétaire est le produit du nombre de décès supplémentaires de l'année, par tonne émise, et de la valeur d'une vie statistique.

Ce calcul est critiquable à bien des égards. Premièrement, il néglige la persistance des dommages. Deuxièmement, les changements climatiques auront de nombreux autres effets qui ne sont pas comptabilisés. Troisièmement, malgré cela, Botteon & Carraro déterminent un bénéfice mondial de 208,29 dollars par tonne de carbone, valeur très élevée, qui correspond au sommet des intervalles habituellement proposés. Enfin, en vertu de ce raisonnement, la population des pays devient le principal déterminant du dommage subi. Les valeurs utilisées par Botteon & Carraro sont reprises dans le tableau 8.3.

Tableau 8.3 : Bénéfice de la réduction des émissions dans Botteon & Carraro (1995)

Pays	b (\$/tC)
Etats-Unis et Canada	8,51
Europe	18,83
Japon	26,01
Europe de l'est et Russie	25,10
Chine et Inde	129,84
Somme	208,29

Botteon & Carraro supposent que les signataires de l'accord de coopération redistribuent les gains de l'entente conformément au vecteur de Shapley (1974). Nous garderons cette hypothèse, ce qui justifie que nous apportions quelques explications sur cette règle de partage. La valeur de Shapley du joueur i , au sein de la coalition I , dépend de sa contribution au bien-être de toutes les coalitions intermédiaires S qu'il peut former avec les joueurs de I :

$$x_i = \sum_{S \subset I} \frac{(|S|-1)! \cdot (|I|-|S|)!}{|I|!} \cdot [v(S) - v(S - \{i\})], \quad (8.1)$$

où $v(S)$ est le bien-être collectif de la coalition S .

Le partage des gains conformément au vecteur de Shapley “rémunère” les signataires à la hauteur de leur capacité à augmenter le bien-être des autres. Cette règle de répartition trouve sa légitimité dans la reconnaissance réciproque du pouvoir de chacun, i.e. de sa capacité à

exercer un chantage. Par exemple, si un joueur n'apporte rien à la collectivité, il ne recevra rien, car il n'est pas en mesure d'inquiéter ses partenaires. A contrario, si le départ d'un joueur pénalise fortement les autres signataires, la menace de mettre ce plan à exécution incite les autres à lui verser une prime.

Pour étudier ces questions, nous reprenons le modèle calibré du chapitre 7 réduit aux plus gros pollueurs : les Etats-Unis, l'Union européenne, le Japon, l'ex-U.R.S.S. et la Chine. Le calibrage des fonctions de coût est celui que nous déduisions de GREEN. La région “reste du monde” est éliminée car le nombre de coalitions possibles serait trop grand dans le cas contraire, rendant quasi impossible le calcul du vecteur de Shapley.

Les vecteurs de gains et de dépollutions pour toutes les coalitions possibles sont présentés dans l'annexe 8.1 (voir l'appendice 4 pour le calcul de ces derniers), sous la forme de deux tableaux. Pour savoir si une coalition est tributaire du resquillage, i.e. si elle vérifie la condition de stabilité interne ou non, il suffit de comparer le gain des signataires au sein de la coalition avec celui qu'ils obtiendraient en la quittant. Cet exercice fastidieux permet de remplir la première ligne du tableau 8.4, où sont recensées toutes les coalitions dont les signataires ne sont pas tentés de resquiller. Les coalitions retenues dans la seconde ligne du tableau vérifient, en plus, la condition de stabilité externe. Pour les isoler, on compare le bénéfice des pays étrangers à la coalition à celui qu'ils obtiennent s'ils la rejoignent.

Tableau 8.4 : Coalitions spontanées

Conditions	Coalitions
Profitabilité et stabilité interne	Toutes les coalitions de 2 pays {1,4,5} {2,4,5} {3,4,5}
Profitabilité, stabilités interne et externe	{1,4,5} {2,4,5} {3,4,5}

Notes : les conventions utilisées sont les suivantes :
1 = Etats-Unis 2 = Japon 3 = Union européenne
4 = Ex-URSS 5 = Chine

La première chose à noter est que les coalitions de quatre pays et plus sont toutes tributaires du resquillage. Leurs signataires obtiennent des paiements supérieurs à leur

équilibre de Nash mais ils gagnent plus s'ils quittent l'entente. Ce premier résultat confirme à nouveau une conclusion courante de la littérature, selon laquelle les coalitions de plus de trois joueurs ne sont jamais stables (la spécification utilisée par Barrett (1994) est une exception : voir le tableau 8.1).

L'autre résultat général de cette simulation est que l'offre de transferts rend possible des ententes mutuellement bénéfiques et stables entre des pays très différents, alors qu'elles n'étaient pas envisageables en l'absence de redistribution des gains : dans ce cas, les pays de l'annexe I et II tirent le plus grand avantage de la coopération, mais ce sont l'ex-U.R.S.S. et la Chine qui supportent la plus grande partie de l'effort de dépollution ; une coopération entre ces régions impliquait donc une répartition inéquitable des gains.

Au contraire, lorsque les pays sont rémunérés à la hauteur de leur contribution au bien-être collectif, l'ex-U.R.S.S. et la Chine participent systématiquement aux coalitions qui vérifient les trois conditions de profitabilité, de stabilités interne et externe. A chaque fois, ils sont associés à un pays qui attache une plus grande valeur à la réduction des émissions de dioxyde de carbone, à savoir les Etats-Unis, l'Union européenne ou le Japon. Sur ce point, cette simulation approuve Botteon & Carraro (1995, p. 10) lorsqu'ils affirment que « la conclusion, selon laquelle le pays montrant le plus grand dommage marginal est le pivot autour duquel les coalitions environnementales peuvent être formées, est assez robuste »⁷.

Pour terminer cette description des résultats, nous isolons la coalition stable qui regroupe l'Union européenne, l'ex-U.R.S.S. et la Chine. Ce choix est arbitraire mais les commentaires afférents s'appliquent aussi bien aux autres coalitions, qui sont qualitativement identiques.

Tableau 8.5 : Redistribution entre les signataires de la coalition {245}

⁷ - « The conclusion that the country with the highest marginal damage is the pivot around which environmental coalitions can be formed is quite robust ».

Pays	Paiement primaire (a)	Valeur de Shapley (a)	Transfert versé (a)	Baisse des émissions (en GtC) (b)
Europe	0,080	0,051	0,029	0,001
Ex-URSS	-0,002	0,010	-0,012	0,021
Chine	-0,007	0,010	-0,017	0,027
Somme	0,071	0,071	0	0,049

Notes :

- (a) : Milliards de dollars ;
 (b) : par rapport aux émissions de Nash.

Le tableau 8.5 met en évidence la répartition très inégalitaire de l'effort de dépollution entre les signataires d'un accord qui réunirait l'Union européenne, l'ex-U.R.S.S. et la Chine. En l'absence de redistribution des gains, seule l'Europe tirerait avantage de cette coopération, au dépend des deux autres régions qui seraient perdantes. Le partage des gains rééquilibre les positions. L'Europe reste le principal bénéficiaire de l'entente mais offre des dédommagements à l'ex-U.R.S.S. et à la Chine. L'accord ainsi obtenu est stable : tous les signataires jouissent d'une amélioration de leur situation par rapport à l'équilibre de Nash ; ils ne désirent pas quitter cette entente car les gains qu'ils obtiendraient en le faisant seraient inférieurs.

A nouveau, il est délicat de tirer des conséquences pratiques de ces simulations car elles dépendent trop directement d'un calibrage qui, même s'il reflète d'assez près le sentiment général, reste assez incertain. Un constat se dégage toutefois. L'association des pays soucieux de la préservation de l'environnement et des pays capables de réduire facilement leurs rejets est mutuellement bénéfique et donne lieu à des accords stables. Les rôles de chacun au sein d'une telle entente sont clairement définis. Les pays pour qui la réduction des émissions est très bénéfique offrent une aide sans laquelle l'accord ne verrait pas le jour. Ce transfert rémunère le service de dépollution des autres pays. Ces derniers gagnent à devenir des "exportateurs de services environnementaux".

8.4 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous dépassons l'étude positive des négociations pour tenter de comprendre, en utilisant la théorie des coalitions, la configuration bipartite de la Convention-cadre sur les changements climatiques. Plus exactement, nous retenons des coalitions dites "spontanées", c'est-à-dire qui se constituent automatiquement, du fait des intérêts des pays, et qui durent.

Nous étudions d'abord des accords internationaux sur l'environnement ouverts à tous et sans système de redistribution des gains. Grâce à un algorithme de résolution informatique venant à l'appui du raisonnement, nous généralisons la littérature sur les coalitions spontanées, qui étudie habituellement soit une multitude de pays identiques, soit deux à trois pays différents, en décrivant le cas d'un grand nombre de pays différents. Nous montrons que la coalition regroupe les pays les plus soucieux de préserver l'environnement, mais les moins à même de le faire. Réciproquement, nos résultats suggèrent que l'absence de transferts décourage l'adhésion des pays capables de réduire leurs émissions à peu cher, de crainte d'assumer l'essentiel de l'effort collectif de l'entente. Sans présumer de la pertinence de ce parallèle, il est tentant de confronter ces résultats à la réalité des négociations sur le climat : d'un côté, les pays développés listés dans les annexes I et II, a priori désireux d'atténuer l'effet de serre mais dont les gisements de réduction d'émissions sont saturées, et, de l'autre, les pays en développement, qui adoptent provisoirement un comportement attentiste alors qu'ils pourraient réduire leurs émissions à un coût moindre.

Ce premier résultat repose sur l'hypothèse d'absence de transferts entre les pays membres de la coalition. Pour finir, nous levons cette hypothèse en rappelant que la Convention incite les pays de l'O.C.D.E. à aider les pays en développement par des transferts financiers ou technologiques. Nous étudions des accords internationaux sur l'environnement dans lesquelles les gains seraient répartis entre les membres conformément à ce que chacun apporte à l'entente, c'est-à-dire en fonction de leur valeur de Shapley. Avec ce jeu d'hypothèses et en utilisant le calibrage du chapitre 7, toutes les coalitions spontanées regroupent trois participants au plus. Plus intéressante est l'identité de ces derniers : à chaque fois, un pays soucieux d'environnement, mais limité dans sa capacité d'action par des coûts rapidement prohibitifs, et deux pays capables de réduire fortement leurs émissions

(caractérisés par un coût marginal peu pentu) ; les deux derniers assument la plus grande part de la dépollution collective mais reçoivent, en contrepartie, un dédommagement de la part du premier.

Annexe 8.1 - Vecteurs de Shapley

Tableau 1 : Gains des signataires par rapport à la solution de marché
(en milliards de dollars)

Coalition	Etats-Unis	Europe	Japon	Ex-URSS	Chine	Total
{12345}	0,051	0,069	0,028	0,023	0,025	0,196
{2345}	0,067	0,057	0,023	0,014	0,015	0,176
{1345}	0,038	0,092	0,023	0,012	0,012	0,176
{1245}	0,045	0,063	0,044	0,018	0,020	0,190
{1235}	0,042	0,058	0,024	0,011	0,023	0,158
{1234}	0,040	0,055	0,023	0,020	0,007	0,146
{345}	0,043	0,062	0,018	0,006	0,005	0,135
{245}	0,058	0,052	0,032	0,011	0,011	0,163
{235}	0,049	0,049	0,020	0,008	0,013	0,139
{234}	0,045	0,047	0,019	0,012	0,005	0,128
{145}	0,034	0,076	0,030	0,009	0,008	0,157
{135}	0,033	0,070	0,020	0,008	0,010	0,141
{134}	0,031	0,065	0,019	0,010	0,005	0,130
{125}	0,038	0,054	0,033	0,010	0,018	0,152
{124}	0,036	0,051	0,031	0,016	0,006	0,141
{123}	0,032	0,045	0,019	0,007	0,005	0,108
{45}	0,031	0,046	0,018	0,005	0,003	0,103
{35}	0,035	0,051	0,017	0,006	0,004	0,112
{34}	0,032	0,048	0,017	0,005	0,004	0,105
{25}	0,043	0,046	0,024	0,007	0,010	0,129
{24}	0,039	0,044	0,022	0,009	0,005	0,119
{23}	0,029	0,040	0,016	0,005	0,003	0,093
{15}	0,030	0,058	0,023	0,007	0,007	0,125
{14}	0,029	0,054	0,021	0,007	0,004	0,116
{13}	0,027	0,045	0,016	0,005	0,004	0,097
{12}	0,030	0,043	0,021	0,006	0,004	0,103
{}	0,026	0,040	0,016	0,005	0,003	0,089

Notes : les conventions utilisées sont les suivantes :

1 = Etats-Unis 2 = Japon 3 = Union européenne 4 = Ex-URSS 5 = Chine

Tableau 2 : Dépollutions des pays par rapport à la solution de marché
(en milliards de tonnes de carbone)

Coalition	Etats-Unis	Europe	Japon	Ex-URSS	Chine	Total
{12345}	0,043	0,013	0,005	0,040	0,050	0,151
{2345}	0,026	0,010	0,004	0,031	0,040	0,111
{1345}	0,033	0,008	0,003	0,028	0,036	0,109
{1245}	0,039	0,012	0,002	0,036	0,045	0,134
{1235}	0,042	0,012	0,005	0,005	0,049	0,113
{1234}	0,042	0,013	0,005	0,039	0,007	0,106
{345}	0,026	0,008	0,002	0,016	0,023	0,074
{245}	0,026	0,009	0,002	0,026	0,034	0,097
{235}	0,026	0,010	0,004	0,005	0,039	0,083
{234}	0,026	0,010	0,004	0,030	0,007	0,077
{145}	0,029	0,008	0,002	0,022	0,030	0,090
{135}	0,032	0,008	0,003	0,005	0,035	0,083
{134}	0,032	0,008	0,003	0,027	0,007	0,078
{125}	0,038	0,011	0,002	0,005	0,044	0,100
{124}	0,039	0,011	0,002	0,035	0,007	0,094
{123}	0,041	0,012	0,005	0,005	0,007	0,070
{45}	0,026	0,008	0,002	0,008	0,012	0,055
{35}	0,026	0,008	0,002	0,005	0,020	0,061
{34}	0,026	0,008	0,002	0,014	0,007	0,057
{25}	0,026	0,008	0,002	0,005	0,033	0,074
{24}	0,026	0,009	0,002	0,025	0,007	0,068
{23}	0,026	0,010	0,003	0,005	0,007	0,052
{15}	0,027	0,008	0,002	0,005	0,028	0,070
{14}	0,028	0,008	0,002	0,021	0,007	0,065
{13}	0,031	0,008	0,003	0,005	0,007	0,055
{12}	0,038	0,011	0,002	0,005	0,007	0,063
{}	0,026	0,008	0,002	0,005	0,007	0,048

Notes : les conventions utilisées sont les suivantes :

1 = Etats-Unis 2 = Japon 3 = Union européenne 4 = Ex-URSS 5 = Chine

Conclusion Générale

La croissance économique, en raison principalement de la combustion des énergies fossiles qui l'accompagne, renforce l'effet de serre. Les climatologues mettent en garde l'Humanité contre les effets néfastes de cette tendance qui, selon leurs simulations, provoquera un réchauffement planétaire notable au cours du prochain siècle. Les bouleversements climatiques prévus auront des conséquences néfastes sur le fonctionnement des économies au travers de l'agriculture, de la santé, de l'élévation des océans... D'un point de vue économique, l'effet de serre additionnel définit une externalité négative.

La politique du climat met en balance le développement économique et le climat de la planète ; plus précisément, elle atténue le plus possible les dommages climatiques futurs tout en préservant au mieux le bien-être économique présent. Le fondement de cette stratégie participe du même raisonnement que celui de l'analyse Coût-Avantage traditionnel. Cependant, l'analogie avec ce critère de décision, parfaitement fondée pour définir le programme économique de la politique du climat, ne fonctionne plus en ce qui concerne la méthode. Compte tenu de la persistance des dommages dans le temps, la détermination de la politique optimale du climat nécessite la construction d'un modèle de pollution cumulative approprié. On montre alors que la réaction optimale consiste à égaliser le coût marginal de dépollution (de réduction des émissions) au dommage marginal intertemporel de l'effet de serre additionnel. Compte tenu des propriétés des fonctions utilisées ici, la dynamique de transition consiste à rejoindre asymptotiquement un équilibre stationnaire défini par une stabilisation du climat. La pollution augmente continûment le long de ce sentier.

Le coût d'une politique climatique est fonction de la dépendance des économies vis-à-vis des énergies fossiles et de leur faculté à les éliminer au profit d'autres énergies ou d'autres techniques de production. A moyen et à long terme, l'élasticité de substitution entre l'énergie finale et les autres facteurs, d'une part, et l'élasticité de substitution entre les énergies riches en carbone et les autres, d'autre part, influencent de manière déterminante le coût de la lutte contre l'effet de serre. Les possibilités de substitution ne sont pas figées mais, au contraire,

évoluent au cours du temps grâce, notamment, à l'émergence de technologies énergétiques de remplacement sans carbone, qui inventent de nouveaux moyens d'action.

Les modèles d'équilibre général appliqués suggèrent que le prix à payer pour lutter contre l'effet de serre serait plus lourd pour les pays développés car : l'énergie est généralement plus chère dans ces pays qu'ailleurs ; l'émission de carbone par unité de P.I.B. est moindre dans ces économies que dans les autres. La France et le Japon constituent un exemple particulièrement parlant. Depuis les chocs pétroliers, ces deux pays ont fait le choix du nucléaire et de l'hydraulique pour subvenir à leurs besoins d'électricité, dans l'idée de réduire leur dépendance vis-à-vis des énergies fossiles. Le résultat de cette stratégie se traduit aujourd'hui par une émission de carbone par unité de P.I.B. parmi les plus faibles du monde. En contrepartie, les gisements d'économie de carbone dans ces deux pays sont presque saturés (excepté dans le domaine des transports) et toute mesure de limitation des émissions sera synonyme de pertes conséquentes. Cependant, cette situation est provisoire. Compte tenu du prix élevé des énergies fossiles, les technologies de remplacement sans carbone seront plus rapidement rentables dans ces deux pays. Dans l'hypothèse d'une politique internationale vigoureuse contre l'effet de serre, les pays où l'énergie est chère pourraient donc très vite remplir leurs obligations de dépollution à un coût marginal constant.

Il n'existe pas de profils caractéristiques aussi systématiques pour classer les pays en fonction de leur sensibilité aux bouleversements climatiques. Malgré cela, deux éléments seront déterminants : le poids du secteur primaire dans l'économie et la faculté du pays à s'adapter aux conséquences de l'effet de serre (les technologies, les savoir-faire...). À part cela, la sensibilité des pays au réchauffement climatique dépend de facteurs très divers : la situation géographique, la longueur et la densité de population des zones côtières, le climat d'origine... Les évaluations disponibles suggèrent que les pays en développement cumulent beaucoup d'inconvénients et concluent à leur plus grande vulnérabilité, en pourcentage du P.I.B.

En calibrant un modèle de pollution cumulative à l'aide des évaluations des coûts et des dommages, certains auteurs évaluent la politique optimale du climat. En résumé, elle

nécessiterait une taxe pigovienne sur les émissions de carbone allant progressivement de 5 / 10 à 20 / 30 dollars par tonne entre 2000 et 2100. Les émissions de carbone seraient ainsi réduites de 10 à 15 pour-cent sur la période.

En fait, dans leur grande majorité, les économistes pensent, à l'appui des résultats susmentionnés, qu'il n'y a aucune urgence et que, de toute façon, la réaction optimale de l'Humanité aux changements climatiques passe par une politique modeste.

En forçant le trait, on peut prétendre qu'un tel consensus mettrait la planète en danger s'il était adopté sans discernement. D'une part, l'évaluation des dommages à la base du jugement des économistes repose sur une base scientifique peu assurée. Outre cela, pour les besoins de l'analyse, les estimations extrapolent les résultats des modèles climatologiques dans toutes les dimensions, pour retenir, finalement, un dommage continu et proportionnel à l'élévation de la température moyenne à la surface de la Terre. Ainsi :

- l'incertitude sur la relation entre l'accumulation des gaz à effet de serre et les changements climatiques est éliminée en utilisant l'estimation médiane des modèles climatologiques ;
- les risques de catastrophes climatiques irréversibles, sources potentielles de discontinuité dans la fonction de dommage, sont négligés .

Toutes ces hypothèses ad hoc nous renvoient, tout compte fait, une image “lissée” de l'incidence des bouleversements climatiques sans réel fondement scientifique.

* * *

*

La perspective d'une catastrophe climatique irréversible, si tant est que ce risque soit réel, oblige à repenser en profondeur la gestion temporelle de l'effet de serre. Dans ce schéma, le choix est essentiellement binaire : par l'intermédiaire de son émission de gaz à effet de serre, l'Humanité décide, ou non, de provoquer une catastrophe climatique en dépassant, ou non, un seuil critique de pollution atmosphérique (ou de température). Le critère de décision rationnel pour arbitrer cette alternative consiste à comparer les gains de la “stratégie de préservation” et de la “stratégie de passage”.

Le choix dépend de la proximité et de la gravité de la catastrophe. Si l'échéance de la catastrophe est imminente, dans le sens où le seuil critique de pollution est proche de la pollution d'origine, la préservation exige une norme d'émission maximale très contraignante et très coûteuse. Dans ce cas, la stratégie d'évitement est dominée par sa concurrente, d'autant plus si le dommage irréversible est modéré. La politique de passage consiste alors à trouver le moment optimal pour subir la catastrophe, sachant que, en vertu de l'actualisation, son incidence est moindre lorsqu'elle est éloignée dans le temps. Au contraire, dans l'hypothèse d'un seuil critique éloigné et voisin de la pollution stationnaire du modèle équivalent sans catastrophe, la préservation surpassé l'autre option, surtout dans le cas d'une irréversibilité majeure.

Replacés dans le contexte de la littérature économique, ces résultats appellent deux commentaires. D'abord, notons que les instruments économiques de la lutte contre l'effet de serre diffèrent éventuellement selon que l'on prévoit, ou non, une catastrophe climatique. La proposition de fond du modèle de pollution cumulative traditionnel suggère de régler l'externalité dynamique en internalisant les coûts sociaux futurs au moyen d'une taxe pigovienne, égale à la somme actualisée des flux de dommages marginaux. En pratique, l'évaluation des dommages forme donc le maillon essentiel de cette politique. Devant une catastrophe climatique que l'on veut éviter, l'étape de l'évaluation prend une importance moindre, en dehors de sa faculté à nous renseigner sur la gravité de l'événement. Désormais, l'instrument économique principal devient une norme d'émission maximale décentralisée au moyen d'une taxe sur les émissions. La dynamique de cette dernière résulte moins de l'internalisation des dommages climatiques que de la contrainte d'émission.

Ensuite, au-delà de cette différence instrumentale, une représentation moins lissée des dommages climatiques modifie quantitativement la réaction optimale. Pour comprendre cela, comparons deux situations apparemment proches. Pour commencer, pensons l'externalité climatique comme un dommage augmentant graduellement de 1/2 pour-cent du P.I.B. mondial par degré Celsius de température supplémentaire ; cette description coïncide, à peu près, avec celle de la littérature économique. Partant de cette hypothèse, les modèles

appliqués évaluent l'équilibre stationnaire optimal du climat aux alentours de 6 à 7 degrés Celsius au-dessus de la température naturelle. Imaginons maintenant que les dommages soient négligeables avant l'élévation plancher de la température de 3 degrés Celsius (correspondant au doublement de la concentration en équivalent carbone) et identiques aux précédents ensuite de façon permanente. S'il demeure préférable de passer cette borne naturelle, l'équilibre stationnaire de long terme se confond avec le premier cas. Mais, de toute évidence, le franchissement de la température critique pose un “cas de conscience” et motive une inclination réelle pour la préservation. Le choix s'opère entre, d'un côté, le coût économique de la norme d'émission maximale et, de l'autre, un dommage irréversible qui peut être évité.

Ces fictions illustrent bien l'importance de la représentation mentale des dommages climatiques sous-jacente aux évaluations disponibles dans la littérature. Cependant, vu notre compréhension des mécanismes climatiques à l'heure actuelle, nous ignorons tout des risques catastrophiques, au point que l'analyse précédente n'a aucune utilité pour l'instant. Cela implique-t-il qu'il faille écarter purement et simplement ces événements du domaine du possible pour se concentrer exclusivement sur ce qui est prévisible ? La réponse est évidente : les catastrophes doivent être incorporées à la planification comme faisant partie du domaine du probable.

Le cas de figure d'une catastrophe incertaine du point de vue de son incidence (l'événement “aucune conséquence” pouvant faire partie de l'ensemble des réalisations) met à jour une autre dimension de la gestion du climat. Sans progrès scientifiques susceptibles d'améliorer les prévisions sur sa gravité, ce scénario ne diffère pas fondamentalement de l'analyse ci-dessus : le planificateur compare le gain attendu de la stratégie de passage à celui de la préservation et, en fonction de l'ordre obtenu, accepte ou refuse la catastrophe.

Par contre, la révélation au cours du temps de la gravité réelle de la catastrophe, grâce à la recherche scientifique, modifie la procédure de décision. Dans ces circonstances, la comparaison des stratégies précédentes, c'est-à-dire la préservation et le passage, ne suffit plus. En effet, l'attitude consistant à repousser l'action irréversible en attendant les informations complémentaires (baptisée “stratégie de précaution”), donc à préserver

l'éventail des choix, assure un bénéfice attendu plus important que la préservation. Cette différence provient, selon l'interprétation, de la valeur de l'information ou de la disparition du risque d'erreur avec l'apprentissage. Elle définit une valeur de quasi-option. Il s'ensuit que le critère de décision basé sur l'arbitrage entre la préservation et le passage introduit un biais dans le sens de la destruction de l'environnement. Celui-ci ne peut être corrigé qu'en réévaluant la stratégie de préservation pour tenir compte de la valeur de quasi-option.

L'implication pratique de cette découverte dépend, avant tout, de la crédibilité des scénarios catastrophiques imaginés par les scientifiques. Ensuite, elle dépend de l'ordre chronologique de la séquence catastrophe climatique / découvertes scientifiques. Si les progrès scientifiques précèdent le moment où les risques de catastrophes deviendront non négligeables, la valeur de quasi-option est nulle car cette chronologie empêche tout risque d'erreur irréparable. Dans le cas contraire, on aurait de bonnes raisons de donner une préférence a priori à la préservation, en attendant les éclaircissements prochains. Par contre, la question de savoir jusqu'à quel point donner la primauté à la préservation ne pourrait être tranchée qu'après les progrès scientifiques.

Les incitations répétées de la Convention-cadre sur les changements climatiques en faveur de la recherche climatologique peuvent s'interpréter à l'aide des discussions précédentes. Dans la pratique, il existe deux moyens pour s'assurer que les informations scientifiques surviendront avant les catastrophes climatologiques potentielles. En premier lieu, une limitation forte des émissions de gaz à effet de serre ralentit les changements climatiques. Ceci réduit l'exposition aux risques catastrophiques et laisse le temps d'en apprendre plus long sur le climat. L'inconvénient de cette stratégie est son coût. En second lieu, la réaffectation des financements de recherche vers la climatologie accélère les découvertes.

Ces deux attitudes procèdent, certes, de la même intention mais diffèrent par leurs résultats. Compte tenu de l'inertie climatique des océans, la seconde est plus dangereuse. En effet, même si l'on prenait toutes mesures, aujourd'hui, pour stabiliser les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, il faudrait patienter 20 à 30 ans pour observer les conséquences définitives de la situation présente. Il s'ensuit que, si notre capacité

d'anticipation n'excède pas ce délai, la plupart des risques pourraient être subis sans que l'on puisse réagir d'aucune façon. Dans ces conditions, il semble étonnant que la réaction internationale tarde à venir ; mais, s'inquiéter de cela revient à négliger la question délicate des interdépendances stratégiques entre les pays.

* * *

*

La politique mondiale du climat s'applique si les pays s'engagent fermement à tenir compte du bien-être collectif de l'Humanité. Sinon, issue plus probable et, en tout cas, plus représentative de l'état actuel des négociations, les Etats adoptent un comportement non coopératif et définissent leur stratégie de lutte contre l'effet de serre en internalisant leurs dommages domestiques uniquement. Un excès de pollution, par rapport à l'optimum mondial, découle logiquement de cette attitude.

La littérature économique fournit quelques évaluations des stratégies nationales de lutte contre l'effet de serre. Les études en question établissent que les taxes non coopératives ne dépassent pas, au mieux, 1 dollar par tonne de carbone et qu'elles sont négligeables pour la plupart des pays en développement. En conséquence, les taux de dépollution unilatéraux, évalués par rapport à la tendance, sont très faibles et inférieurs à 3 pour-cent. Tout compte fait, ces analyses suggèrent que les pays n'entreprendront presque rien individuellement.

De fait, le règlement du problème passe nécessairement par un accord de coopération. Mais, les négociations internationales s'avèrent délicates. "Sur le papier", la Convention-cadre sur les changements climatiques opposent deux camps. D'un côté, les pays de l'O.C.D.E. acceptent, en la ratifiant, de ramener leurs émissions de carbone au niveau de 1990 d'ici à la fin du siècle. De l'autre, les pays en développement, arguant la responsabilité historique des pays du Nord dans l'état actuel du climat, annoncent qu'ils n'entreprendront rien pour l'instant. Ils reverront éventuellement leur position sous condition de bonne conduite des pays développés, appréciée à l'aune d'initiatives tangibles de limitation des émissions et de propositions de transferts financiers et technologiques.

Dans les faits, les progrès en matière de réduction effective des émissions tardent à venir. Les pays de l’O.C.D.E. justifient leur attentisme en prétextant le manque de flexibilité du traité de coopération. Leurs suggestions d’amélioration de la Convention mettent en avant tantôt l’institution d’un marché des droits de polluer à l’échelle internationale, tantôt la définition de critères précis régissant le système d’application conjointe (ou les deux).

Quoique dommageables pour la gestion internationale du climat, les arguments invoqués par les pays développés ne semblent pas fallacieux. De fait, l’objectif de dépollution défini par la Convention paraît raisonnable (selon nos calculs, il ne s’éloigne pas sensiblement de l’optimum collectif), mais sa répartition présente, sous la forme de quotas d’émission individuels, pénalise ces pays. Pour l’essentiel, cette situation négative serait imputable, effectivement, à l’inefficacité du traité. Un recours plus systématique à des instruments économiques, comme un marché de permis d’émission et un système d’application conjointe, atténuerait notablement cet état de fait, à condition que les coûts de transaction accompagnant leur création et leur fonctionnement restent limités. Tout en conservant l’équilibre actuel des engagements, l’effort de dépollution de l’O.C.D.E. serait alors redistribué plus efficacement entre les pays du monde, moyennant des transferts financiers ou technologiques venant dédommager la participation des pays en développement. Si de tels aménagements voyaient le jour, l’équilibre stratégique des négociations sur le climat s’établirait donc de la manière suivante :

- les pays développés endosseraient seuls la gestion du climat (au moins provisoirement) ;
- ils susciteraient la participation du reste du monde en subventionnant son action.

Des raisons historique (les émissions cumulées de gaz à effet de serre de part et d’autre) et morale (les inégalités de niveau de vie) contribuent sûrement pour une part importante à cette configuration bipartite des négociations. Mais, à côté de ces arguments, l’étude des coalitions spontanées apporte un éclairage complémentaire et dévoile certains déterminants économiques sous-jacents à l’organisation actuelle de la Convention. Dans le cas d’accords sur l’environnement ouverts à tous sans système de redistribution des profits de la coopération :

- ce sont les pays montrant le plus grand bénéfice marginal de la dépollution et un coût marginal de dépollution fortement croissant qui forment une entente stable ;

- les autres s'excluent d'eux-mêmes, par crainte de devoir supporter, en raison d'un coût marginal de dépollution peu pentu, la plus grande part de la dépollution collective.

Cette configuration dépeint assez bien la forme et l'équilibre actuels du traité international sur le climat, tant du point de vue des hypothèses que des résultats. D'un côté, la Convention a vocation à devenir universelle et l'aide internationale, aussi bien financière que technologique, tarde à se mettre en place. De l'autre, les pays de l'O.C.D.E., seuls membres actifs du traité, possèdent bien les caractérisques décrites ci-dessus (à en croire les évaluations de la littérature).

Le corollaire du résultat précédent est que la recherche d'un accord de coopération large sans transferts multilatéraux nuit à l'efficacité. En effet, les pays ayant un coût marginal de dépollution très pentu sont les moins aptes à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. L'introduction d'un système de redistribution entre les participants de l'entente renverse cette situation. Alors, la coalition spontanée réunit systématiquement :

- un pays soucieux d'environnement, c'est-à-dire évaluant un bénéfice par tonne d'émission évitée élevé, mais limité dans sa capacité d'action ;
- deux pays capables de réduire leurs émissions relativement plus facilement, caractérisés par un coût marginal peu pentu.

La stabilité d'une telle coopération nécessite un mécanisme d'aide, sous forme de transferts du premier vers les seconds. Là encore, le parallèle avec les négociations sur le climat fonctionne bien, puisqu'il semble que la Convention s'achemine lentement vers une telle solution.

Glossaire

La **variable d'état** indique la position du système à chaque instant du temps. La dérivée par rapport au temps de la variable d'état donne l'évolution du système à chaque instant.

La **variable de contrôle** (ou de commande) est une variable endogène avec laquelle on influence la trajectoire du système dans un certain but.

Le vecteur de contrôle est dit **admissible** s'il respecte les conditions suivantes :

- il est défini sur un intervalle de temps donné ;
- ses valeurs appartiennent au domaine de définition du problème ;
- il doit être continu par morceaux.

Par extension, la trajectoire associée à un contrôle admissible est dite admissible.

Le vecteur de contrôle est choisi de manière à maximiser (ou minimiser) une **fonction d'objectif**.

Le **principe du maximum** énonce l'ensemble des **conditions d'optimalité** et de **transversalité** nécessaires pour parvenir à ce résultat.

Nous appellerons **faisable** tout vecteur de contrôle admissible conforme aux conditions d'optimalité du principe du maximum. Par extension, la trajectoire qui lui est associée sera dite faisable.

Tout vecteur de contrôle faisable respectant les conditions de transversalité est **optimal**.

Le principe du maximum utilise des **variables adjointes** (ou co-état). Chacune est couplée à une variable d'état donnée. Des similitudes permettent de comparer ces variables adjointes à des multiplicateurs de Lagrange.

Une **isocline** est la représentation graphique d'un ensemble de points tels que la dérivée d'une variable par rapport à une autre est constante.

L'**état stationnaire** est un état particulier où le système se maintient infiniment.

Appendice 1 : Principe du Maximum

Soit le problème de contrôle optimal général :

$$\max V = \int_0^T v(s(t), c(t), t) dt + \phi(s(T), T),$$

sous les contraintes

$$\dot{s} = f(s(t), c(t), t),$$

$$g(s(t), c(t), t) \geq 0,$$

$$s(0) = s_0,$$

où

$s(t)$ est la variable d'état,

$c(t)$ est la variable de contrôle,

$\phi(s(T), T)$ est la fonction d'héritage,

$[0, T]$ est l'horizon de planification,

s_0 est la valeur de l'état à la borne inférieure de l'intervalle de planification,

T et $s(T)$ sont libres.

En définissant la variable adjointe (ou co-état) $\pi(t)$ associée à l'état, le Hamiltonien s'écrit :

$$H(s(t), c(t), \pi(t), t) = v(s(t), c(t), t) + \pi(t) \cdot f(s(t), c(t), t).$$

En appelant $\lambda(t)$ le multiplicateur de Lagrange associé à $g(s(t), c(t), t) \geq 0$, le Lagrangien

s'écrit :

$$L(s(t), c(t), \pi(t), \lambda(t), t) = H(s(t), c(t), \pi(t), t) + \lambda(t) \cdot g(s(t), c(t), t).$$

Théorème 1 (Léonard & Long, 1992, théorème 6.5.1, p. 211) : **Principe du maximum.**

Soit $c^*(t)$ la solution optimale de ce problème et $s^*(t)$ la trajectoire correspondante de la variable d'état. Alors, il existe $\pi(t)$ et $\lambda(t)$ tels que :

(i) $c^*(t)$ maximise $\mathcal{L}(s^*(t), c(t), \pi(t), \lambda(t), t)$, avec $g(s^*(t), c^*(t), t) \geq 0$. Il s'ensuit que

$$\frac{\partial \mathcal{L}(s^*(t), c^*(t), \pi(t), \lambda(t), t)}{\partial c(t)} = 0,$$

avec $\lambda(t) \geq 0$, $g(s^*(t), c^*(t), t) \geq 0$ et $\lambda(t) \cdot g(s^*(t), c^*(t), t) = 0$.

(ii) $\pi(t)$ est continue et dérivable par morceaux. Elle vérifie l'équation différentielle

$$\dot{\pi}(t) = -\frac{\partial \mathcal{H}(s^*(t), c^*(t), \pi(t), \lambda(t), t)}{\partial s(t)}.$$

(iii) $\dot{s}(t) = \frac{\partial \mathcal{L}(s^*(t), c^*(t), \pi(t), \lambda(t), t)}{\partial \pi(t)}$.

(iv) Les conditions de transversalité s'écrivent :

$$\pi^*(T) = \frac{\partial \phi(s^*(T), T)}{\partial s(T)},$$

$$\mathcal{H}(s^*(T^*), c^*(T^*), \pi(T^*), T^*) - \frac{\partial \phi(s^*(T^*), T^*)}{\partial T} = 0.$$

Remarque : dans le modèle que nous utilisons, nous procédons implicitement au changement de variable $p(t) = -\pi(t)$. Ceci implique les modifications suivantes :

$$\mathcal{H}(s(t), c(t), p(t), t) = v(s(t), c(t), t) - p(t) \cdot f(s(t), c(t), t),$$

$$\mathcal{L}(s(t), c(t), p(t), \lambda(t), t) = \mathcal{H}(s(t), c(t), p(t), t) + \lambda(t) \cdot g(s(t), c(t), t),$$

$$(ii) \quad \dot{p}(t) = -\dot{\pi}(t) = \frac{\partial \mathcal{H}(s^*(t), c^*(t), p(t), \lambda(t), t)}{\partial s(t)},$$

$$(iii) \quad \dot{s}(t) = -\frac{\partial \mathcal{L}(s^*(t), c^*(t), p(t), \lambda(t), t)}{\partial p(t)}.$$

Théorème 2 (Léonard & Long, 1992, théorème 6.5.2, p. 213) : **Conditions suffisantes.**

Si $L(s(t), c(t), \pi(t), \lambda(t), t)$ est concave (strictement concave) en (s, c) et si $(s^*(t), c^*(t))$ vérifie le théorème 1, alors $(s^*(t), c^*(t))$ est une (l'unique) solution optimale du problème.

Corollaire du théorème 2 (Léonard & Long, 1992, corollaire 6.5.1, p. 214) :

$L(s(t), c(t), \pi(t), \lambda(t), t)$ est concave en (s, c) si :

- (i) $v(s, c, t)$ est concave en (s, c) , $\forall t$,
- (ii) soit $\pi \geq 0$ et $f(s, c, t)$ est concave en (s, c) , soit $\pi \leq 0$ et $f(s, c, t)$ est convexe en (s, c) ,
- (iii) soit $\lambda \geq 0$ et $g(s, c, t)$ est concave en (s, c) , soit $\lambda \leq 0$ et $g(s, c, t)$ est convexe en (s, c) .

Cas particulier :

Les applications économiques du principe du maximum impliquent le plus souvent un horizon de planification infini et une fonction $v(s(t), c(t), t)$ de la forme $e^{-\delta t} \cdot u(s(t), c(t))$.

Dans ce cas, les conditions de transversalité du théorème 1 deviennent :

Condition de transversalité 1 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p(t) \cdot s(t) = 0 \quad (\text{Léonard \& Long, 1992, Corrolaire 9.3.2, p. 289}),$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(s^*(t), c^*(t), \pi^*(t), t) = 0 \quad (\text{Michel, 1981}).$$

Appendice 2 : Propriétés du Hamiltonien et de la variable adjointe

¹

Soit le problème de contrôle optimal :

$$V^*(s_0, s_T, T) = \max \int_0^T v(s(t), c(t), t) dt,$$

sous les contraintes

$$\dot{s} = f(s(t), c(t), t),$$

$$s(0) = s_0 \text{ et } s(T) = s_T.$$

$\pi(t)$ est la variable adjointe (ou co-état) associée à s et $p(t) = -\pi(t)$. Le Hamiltonien s'écrit:

$$H(s(t), c(t), p(t), t) = v(s(t), c(t), t) - p(t) \cdot f(s(t), c(t), t).$$

Soit $(s^*(t), c^*(t))$ la solution optimale du problème ci-dessus. On a donc :

$$\begin{aligned} V^*(s_0, s_T, T) &= \max \int_0^T v(s(t), c(t), t) dt \\ &= \int_0^T v(s^*(t), c^*(t), t) dt \end{aligned}$$

Supposons que $p(t)$ soit une fonction quelconque du temps. Puisque $\dot{s} = f(s(t), c(t), t)$, on peut écrire :

$$V^* = \int_0^T [v(s^*, c^*, t) - p \cdot f(s^*, c^*, t) + p \cdot \dot{s}^*] dt = \int_0^T H(s^*, c^*, p, t) dt + \int_0^T p \cdot \dot{s}^* dt.$$

En intégrant par partie la seconde intégrale, on trouve :

$$V^* = \int_0^T [H(s^*, c^*, p, t) - \dot{p} \cdot s^*] dt + p(T) \cdot s_T - p(0) \cdot s_0.$$

Pour la suite du raisonnement, nous supposons que la fonction $V^*(s_0, s_T, T)$ est dérivable par s_T et T .

¹ - D'après Léonard & Long (1992).

Ces dérivées sont égales à :

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial s_T} = \int_0^T \left[(\mathbf{H}_s - \dot{p}) \cdot \frac{ds^*}{ds_T} + \mathbf{H}_c \cdot \frac{dc^*}{ds_T} + \mathbf{H}_p \cdot \frac{dp}{ds_T} + \mathbf{H}_t \cdot \frac{dt}{ds_T} - s^* \cdot \frac{d\dot{p}}{ds_T} \right] dt + p(T) ;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial T} &= \mathbf{H}(s(T), c^*(T), p(T), T) - \dot{p}(T) \cdot s(T) \\ &+ \int_0^T \left[(\mathbf{H}_s - \dot{p}) \cdot \frac{ds^*}{dT} + \mathbf{H}_c \cdot \frac{dc^*}{dT} + \mathbf{H}_p \cdot \frac{dp}{dT} + \mathbf{H}_t \cdot \frac{dt}{dT} - s^* \cdot \frac{d\dot{p}}{dT} \right] dt + \dot{p}(T) \cdot s_T \end{aligned}$$

L'écoulement du temps est un processus autonome, donc $dt/ds_T = 0$ et $dt/dT = 0$. De plus, puisque $p(t)$ est, par hypothèse, une fonction quelconque, $dp/ds_T = 0$, $d\dot{p}/ds_T = 0$, $dp/dT = 0$, $d\dot{p}/dT = 0$. Les expressions précédentes deviennent

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial s_T} = \int_0^T \left[(\mathbf{H}_s - \dot{p}) \cdot \frac{ds^*}{ds_T} + \mathbf{H}_c \cdot \frac{dc^*}{ds_T} \right] dt + p(T) ,$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial T} = \mathbf{H}(s^*(T), c^*(T), p(T), T) + \int_0^T \left[(\mathbf{H}_s - \dot{p}) \cdot \frac{ds^*}{dT} + \mathbf{H}_c \cdot \frac{dc^*}{dT} \right] dt .$$

Ces relations sont vraies pour toute fonction $p(t)$. Supposons maintenant que $p(t)$ respecte les conditions du théorème 1 de l'appendice 1. Alors, $\mathbf{H}_s - \dot{p} = 0$ et $\mathbf{H}_c = 0$. On en déduit que

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial s_T} = p^*(T) ,$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial T} = \mathbf{H}(s^*(T), c^*(T), p^*(T), T) .$$

Lorsque la fonction $v(s(t), c(t), t)$ est de la forme $e^{-\delta t} \cdot u(s(t), c(t))$, on utilisera les relations

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial s_T} = e^{-\delta T} \cdot \tilde{p}^*(T) ,$$

$$\frac{\partial \mathcal{N}^*}{\partial T} = e^{-\delta T} \cdot \tilde{\mathbf{H}}(s^*(T), c^*(T), \tilde{p}^*(T)) ,$$

où

$$\tilde{p}(t) = e^{\delta t} \cdot p(t) ,$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(s(t), c(t), \tilde{p}(t)) = e^{\delta t} \cdot \mathbf{H}(s(t), c(t), p(t), t) = u(s(t), c(t), t) + \tilde{p}(t) \cdot f(s(t), c(t), t) .$$

Appendice 3 - Propriétés du système au voisinage du point stationnaire

Lorsque la fonction $v(s(t), c(t), t)$ est de la forme $e^{-\delta t} \cdot u(s(t), c(t))$, on simplifie la résolution du système en exprimant le Hamiltonien et la variable adjointe en valeur courante :

$$\tilde{p}(t) = e^{\delta t} \cdot p(t),$$

$$\tilde{H}(s(t), c(t), \tilde{p}(t)) = e^{-\delta t} \cdot H(s(t), c(t), p(t), t) = u(s(t), c(t)) - \tilde{p}(t) \cdot f(s(t), c(t)).$$

Le Hamiltonien courant devient autonome, puisque le temps n'y entre pas explicitement (Tu, 1992, définition 8.4, p. 170). Les conditions nécessaires du principe du maximum deviennent :

$$\dot{\tilde{p}}(t) = e^{\delta t} [\delta \cdot p(t) + \dot{p}(t)] = \delta \cdot \tilde{p}(t) + \tilde{H}_s(s^*(t), c^*(t), \tilde{p}(t)),$$

$$\dot{s}(t) = -\tilde{H}_{\tilde{p}}(s(t), c(t), \tilde{p}(t)).$$

Au point stationnaire (s^*, \tilde{p}^*) , $\dot{\tilde{p}}(t) = \dot{s}(t) = 0$. En linéarisant au voisinage de ce point, on trouve :

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{p}} \\ \dot{s} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \delta + \tilde{H}_{\tilde{p}\tilde{p}} & \tilde{H}_{ss} \\ -\tilde{H}_{\tilde{p}\tilde{p}} & -\tilde{H}_{\tilde{p}s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} - \tilde{p}^* \\ s - s^* \end{pmatrix}.$$

Le polynôme caractéristique de ce système linéaires est :

$$P(\lambda) = \begin{vmatrix} \delta + \tilde{H}_{\tilde{p}\tilde{p}} - \lambda & \tilde{H}_{ss} \\ -\tilde{H}_{\tilde{p}\tilde{p}} & -\tilde{H}_{\tilde{p}s} - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - \delta - \tilde{H}_{sp})(\lambda + \tilde{H}_{sp}) + \tilde{H}_{pp} \cdot \tilde{H}_{ss}.$$

En comparant les deux premiers termes de l'équation caractéristique, on s'aperçoit facilement que les racines de l'équation caractéristique apparaissent par paires : si $P(\lambda_1) = 0$ et si $\lambda_2 = -\lambda_1 + \delta$, alors $P(\lambda_2) = 0$. Il s'ensuit que les parties réelles des racines de l'équation

caractéristique $P(\lambda) = 0$ sont soit de signes opposées, soit toutes deux positives, comme l'indique le tableau de signes ci-dessous :

$\operatorname{Re}(\lambda_1)$	$-\infty$	$-$	0	$+$	δ	$+$	$+\infty$
$\operatorname{Re}(\lambda_2) = -\operatorname{Re}(\lambda_1) + \delta$	$+\infty$	$+$	δ	$+$	0	$-$	$-\infty$

Ceci permet d'énoncer le théorème suivant :

Théorème 1 (Léonard & Long, 1992, théorème 9.5.1, p. 294) :

Les états stationnaires des problèmes autonomes à horizon infini possèdent soit les propriétés de nœud instable, soit les propriétés de point-selle.

Appendice 4 - Détermination de la coalition stable et du vecteur de Shapley

Le programme utilise 3 spécifications. Nous commençons par écrire la résolution de chacune avant de proposer le programme proprement dit.

Notations : N : nombre de régions

n_i : nombre de pays dans la région i

α_i : nombre de signataires de l'A.I.E. issus de la région i : $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$

q_i : dépollution du pays i

Q : dépollution mondiale

Q_s : dépollution de la coalition

Q_{ns} : dépollution agrégée des free riders

Spécification n°1 (SUB Spec1 dans le programme) :

$$B_i(Q) = \frac{b_i}{N} \left(a \cdot Q - \frac{Q^2}{2} \right) \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot \frac{q_i^2}{2}.$$

Les free riders égalisent leur bénéfice marginal et leur coût marginal :

$$B'_i(Q) \equiv b_i \cdot \frac{(a - Q)}{N} = c_i \cdot q_i \equiv C'_i(q_i) \Rightarrow q_i = \frac{b_i}{c_i} \cdot \frac{(a - Q)}{N}.$$

Toutes régions confondues, la dépollution globale des free riders est :

$$Q_{ns} = z(\alpha) \cdot \frac{(a - Q)}{N} \text{ avec } z(\alpha) = \sum_{i=1}^N (n_i - \alpha_i) \cdot \frac{b_i}{c_i}.$$

Sachant que $Q = Q_s + Q_{ns}$, la fonction de réaction des free riders s'écrit :

$$Q_{ns} = P(\alpha) \cdot (a - Q_s) \text{ avec } P(\alpha) = \frac{z(\alpha)}{N + z(\alpha)} < 1.$$

Il s'ensuit que $Q = Q_s \cdot (1 - P(\alpha)) + a \cdot P(\alpha)$. Les signataires de l'A.I.E. maximisent leur bien être collectif sachant la réaction des free riders :

$$\max_{q_i} \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i \cdot b_i}{N} \left[a \cdot (Q_s \cdot (1 - P(\alpha)) + a \cdot P(\alpha)) - (Q_s \cdot (1 - P(\alpha)) + a \cdot P(\alpha))^2 / 2 \right] - c_i \cdot \frac{q_i^2}{2} \right\}$$

Ils égalisent le bénéfice marginal de la coalition à leur coût marginal individuel :

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot b_i \cdot (1 - P(\alpha))^2 \cdot \frac{a - Q_s}{N} = c_i \cdot q_i \Rightarrow q_i = \frac{y(\alpha)}{c_i} \cdot (1 - P(\alpha))^2 \cdot \frac{a - Q_s}{N}$$

avec $y(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot b_i$.

La dépollution de la coalition est donc :

$$Q_s = \frac{(1 - P(\alpha))^2 \cdot a \cdot d(\alpha)}{N + (1 - P(\alpha))^2 \cdot d(\alpha)} \text{ avec } d(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \frac{y}{c_i}.$$

On en déduit que la dépollution mondiale :

$$Q = \frac{(1 - P(\alpha))^3 \cdot a \cdot d(\alpha)}{N + (1 - P(\alpha))^2 \cdot d(\alpha)} + a \cdot P(\alpha)$$

Ce résultat permet de connaître, pour tout vecteur α , les dépollutions et les gains des pays.

Spécification n°2 (SUB Spec2 dans le programme) :

$$B_i(Q) = b_i \cdot Q \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot E_i \cdot \left[\left(1 - \frac{q_i}{E_i} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{q_i}{E_i} \right) + \frac{q_i}{E_i} \right].$$

Les free riders égalisent leur bénéfice marginal et leur coût marginal :

$$B'_i(Q) \equiv b_i = -c_i \cdot \ln \left(1 - \frac{q_i}{E_i} \right) \equiv C'_i(q_i) \Rightarrow q_i = E_i \cdot \left(1 - e^{-b_i/c_i} \right).$$

Toutes régions confondues, la dépollution globale des free riders est :

$$Q_{ns} = \sum_{i=1}^N (n_i - \alpha_i) \cdot E_i \cdot \left(1 - e^{-b_i/c_i} \right).$$

Les signataires égalisent le bénéfice marginal de la coalition à leur coût marginal individuel :

$$\sum_{i=1}^N B'_i(Q) \equiv \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot b_i = -c_i \cdot \ln\left(1 - \frac{q_i}{E_i}\right) \equiv C'_i(q_i) \Rightarrow q_i = E_i \cdot \left(1 - e^{-y(\alpha)/c_i}\right)$$

avec $y(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot b_i$.

La dépollution de la coalition est donc :

$$Q_{ns} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot E_i \cdot \left(1 - e^{-y(\alpha)/c_i}\right).$$

On en déduit que la dépollution mondiale :

$$Q = Q_{ns} + Q_s$$

Spécification n°3 (SUB Spec3 dans le programme) :

$$B_i(Q) = b_i \cdot Q \text{ et } C_i(q_i) = c_i \cdot q_i^{d_i}.$$

Les free riders égalisent leur bénéfice marginal et leur coût marginal :

$$B'_i(Q) \equiv b_i = c_i \cdot d_i \cdot q_i^{d_i-1} \equiv C'_i(q_i) \Rightarrow q_i = \left[\frac{b_i}{c_i \cdot d_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}.$$

Toutes régions confondues, la dépollution globale des free riders est :

$$Q_{ns} = \sum_{i=1}^N (n_i - \alpha_i) \cdot \left[\frac{b_i}{c_i \cdot d_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}.$$

Les signataires égalisent le bénéfice marginal de la coalition à leur coût marginal individuel :

$$\sum_{i=1}^N B'_i(Q) \equiv \alpha_i \cdot b_i = c_i \cdot d_i \cdot q_i^{d_i-1} \equiv C'_i(q_i) \Rightarrow q_i = \left[\frac{y(\alpha)}{c_i \cdot d_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}$$

avec $y(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot b_i$.

La dépollution de la coalition est donc :

$$Q_{ns} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \left[\frac{y(\alpha)}{c_i \cdot d_i} \right]^{\frac{1}{d_i-1}}.$$

On en déduit que la dépollution mondiale :

$$Q = Q_{ns} + Q_s.$$

' Programme rédigé en Qbasic (Dos 6.22)

' Q : dépollution globale
 ' q : dépollution individuelle

' Spécification N°1 :
 ' $B(Q)=b.(a.Q-Q^2/2)/N$ et $C(q)=c.Q^2/2$

' Spécification N°2 :
 ' $B(Q)=b.Q$ et $C(q)=c.E.((1-q/E).ln(1-q/E)+q/E)$

' Spécification N°3 :
 ' $B(Q)=b.Q$ et $C(q)=c.q^d$.

' *** Déclaration des sous-routines ***

```
DECLARE SUB Boucle () : DECLARE SUB BoucleEntree () : DECLARE SUB BoucleSortie ()  

DECLARE SUB Calibrages () : DECLARE SUB ChoixSpec () : DECLARE SUB CoalHomog () : DECLARE SUB Scenario ()  

DECLARE SUB Fichier () : DECLARE SUB Fichier1 () : DECLARE SUB Fichier2 () : DECLARE SUB notations ()  

DECLARE SUB Imputations () : DECLARE SUB Shapley ()  

DECLARE SUB InputManuel () : DECLARE SUB InputParam () : DECLARE SUB ParamDefaut ()  

DECLARE SUB MenuManuel () : DECLARE SUB MenuModifGal ()  

DECLARE SUB Profits () : DECLARE SUB PaiementsNashCoop ()  

DECLARE SUB Spec1 () : DECLARE SUB Spec2 () : DECLARE SUB Spec3 () : DECLARE SUB VersSpec ()  

DECLARE SUB StabExterne () : DECLARE SUB StabInterne ()  

DECLARE SUB Vecteur () : DECLARE SUB VectCoop () : DECLARE SUB VectNash ()  

DECLARE SUB TabGeneral () : DECLARE SUB AffichageResult ()  

DECLARE SUB TestStabIteration () : DECLARE SUB TestManuel ()
```

' *** Définition des paramètres ***

```
COMMON SHARED a, a$, b, c, choix, d, j, k, Khi, valeur, n, NT, ouvert, P, pi, PIcoop, PInoncoop, precis  

COMMON SHARED prog, Q, Qcoop, Qnoncoop, R, spec, t, t1, t2, test1, test2, transfert, w1, w2, y  

'$DYNAMIC  

DIM SHARED a(5), aa(5, 32), alpha(2, 1), b(1), c(1), coalition(1, 1, 1, 1, 1), d(1)  

DIM SHARED Depol(5, 32), e(1), j(5), n(1), nul(5), pi(2, 2), ps(1), pns(1)  

DIM SHARED Qs(1), Qns(1), v(1, 10), sh(5, 32)  

REDIM SHARED alpha(2, 16), b(16), c(16), d(16), e(16), n(16), pi(2, 16), ps(16), pns(16), Qs(16), Qns(16), v(16, 101)
```

' alpha : variable de participation de la région i

' a : paramètre de la fonction de bénéfice de la spécification n°1

' b : bénéfice moyen du paramétrage automatique

' c : coût moyen du paramétrage automatique

' choix, choice : variables utilisées pour gérer les menus

' d : somme (alpha() * (y / c()), sert au calcul des dépollutions

' Khi : paramètre de tolérance de stabilité

' NT : nombre total de pays

' ouvert : variable binaire, teste si le fichier de sauvegarde est ouvert

' P : somme ((n() - alpha()) * b() / c()), sert au calcul des dépollutions

' pi : profit global pour un vecteur de participation alpha() donné

' PIcoop : profit mondial coopératif

' PInoncoop : profit mondial non coopératif

' precis : pour choisir la précision décimale des résultats

' prog : variable test pour savoir si on étudie un cas particulier ou de base.

' Q : dépollution totale pour un vecteur de participation alpha() donné

' Qcoop : dépollution mondiale coopérative

' Qnoncoop : dépollution mondiale non coopérative

' R : nombre de régions

' spec : choix de la spécification (1 = Spec1 ; 2 = Spec2 ; 3 = Spec3)

' t : compteur

' t1 : multiplicateur du coût du paramétrage automatique

' t2 : multiplicateur du bénéfice du paramétrage automatique

' test1 et 2 : tests de fin des boucles d'entrée et de sortie

' transfert : = 1 si les transferts sont prohibés et = 2 sinon

' y : somme (alpha() * b()), sert au calcul des dépollutions

' alpha() : nombre de signataires issu de la région i

' b() : paramètre du bénéfice de la région i

' c() : paramètre du coût de la région i

' d() : exposant de la fonction de coût de la région i

' n() : nombre de pays dans la région i

' pi() : profit du pays i coopératif (pi(1,i)) et non coopératif (pi(2,i))

' ps() : bénéfice du pays i lorsqu'il participe à l'AIE

' pns() : " " " " ne " pas " "

' qs() : dépollution du pays i lorsqu'il participe à l'AIE

' qns() : " " " " ne " pas " "

' v() : mémoire de l'itération ; sert à comparer deux tours consécutifs

' *** Racine du programme ***

```

CALL ParamDefaut: CALL ChoixSpec
DO WHILE choix <> 9
    CALL TabGeneral: CALL AffichageResult
    ' Menu principal. Gestion des résultats
    LOCATE 20, 1: PRINT "[1] Modifications"
    LOCATE 20, 40: PRINT "[2] Lancer ou Relancer une itération"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[3] Vérifier la stabilité"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[4] Coal° régionales (stabilité interne)"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[5] Valeurs de Shapley"
    LOCATE 22, 40: PRINT "[6] Sauvegarder les résultats"
    LOCATE 23, 1: PRINT "[9] Fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choix
    IF choix = 1 THEN CALL MenuModifGal
    IF choix = 2 THEN CALL Boucle
    IF choix = 3 THEN CALL TestStabIteration
    IF choix = 4 THEN CALL CoalHomog
    IF choix = 5 THEN CALL Shapley
    IF choix = 6 THEN CALL Fichier
    LOOP

```

' *** JEU DU CHAPITRE 7 ***

' Ordre des valeurs : E, b, c, d, n

' CALIBRAGE GREEN (1993)	' CALIBRAGE MR (1993)	' CALIBRAGE RICE (1993)
1 DATA 1.497,0,65,855.210,3.293,1	2 DATA 1.649,0,65,524.053,2.515,1	3 DATA 1.497,0,65,98.257,2.887,1
DATA 0.884,0,87,2292.961,2.854,1	DATA 1.640,1,2,279.804,2.281,1	DATA 0.884,0,87,368.17,2.887,1
DATA 0.417,0,33,3313.288,2.565,1	DATA 1.184,0,1,267.226,1.354,1	DATA 0.417,0,33,1941.242,2.887,1
DATA 1.221,0,1,95.978,2.487,1	DATA 0.754,0,07,292.724,1.310,1	DATA 1.221,0,1,64.368,2.887,1
DATA 0.875,0,07,139.840,2.756,1	DATA 1.743,0,022063,43459.172,1.901,189	DATA 0.875,0,07,79.894,2.887,1
DATA 2.177,0,022063,8921071,3.029,189	DATA 0,0,10E20,10,1	DATA 2.177,0,022063,542809.253,2.887,189

' *** MATRICE DES COALITIONS DE 5 PAYS ***

' utilisée pour le calcul du vecteur de Shapley

' Coalitions singletons	DATA 0,1,1,0,0	DATA 0,1,1,1,0
4 DATA 0,0,0,0,0	DATA 0,1,0,1,0	DATA 0,1,1,0,1
DATA 1,0,0,0,0	DATA 0,1,0,0,1	DATA 0,1,0,1,1
DATA 0,1,0,0,0	DATA 0,0,1,1,0	DATA 0,0,1,1,1
DATA 0,0,1,0,0	DATA 0,0,1,0,1	' Coalitions de 4 pays
DATA 0,0,0,1,0	DATA 0,0,0,1,1	DATA 1,1,1,1,0
DATA 0,0,0,1,0	' Coalitions de 3 pays	DATA 1,1,1,0,1
DATA 0,0,0,0,1	DATA 1,1,1,0,0	DATA 1,1,0,1,1
' Coalitions de 2 pays	DATA 1,1,0,1,0	DATA 1,0,1,1,1
DATA 1,1,0,0,0	DATA 1,1,0,1,1	DATA 0,1,1,1,1
DATA 1,0,1,0,0	DATA 1,1,0,0,1	' Coalition de 5 pays
DATA 1,0,0,1,0	DATA 1,0,1,1,0	DATA 1,1,1,1,1
DATA 1,0,0,0,1	DATA 1,0,1,0,1	
	DATA 1,0,0,1,1	

END

SUB AffichageResult

' Calcul des revenus permis par la coalition stable

IF transfert = 1 THEN

CALL Profits

ELSE

transfert = 1: CALL Profits

transfert = 2: CALL Profits

END IF

' Présentation à l'écran des résultats de l'itération

FOR i = 1 TO R

LOCATE i + 1, 41: PRINT alpha(1, i)

LOCATE i + 1, 46: IF alpha(1, i) > 0 THEN PRINT INT(ps(i) * precis) / precis

LOCATE i + 1, 56: IF alpha(1, i) < n(i) THEN PRINT INT(pns(i) * precis) / precis

LOCATE i + 1, 63: IF alpha(1, i) > 0 THEN PRINT INT(Qs(i) * precis) / precis

LOCATE i + 1, 68: IF alpha(1, i) < n(i) THEN PRINT INT(Qns(i) * precis) / precis

NEXT i

X = 0: IF R < 16 THEN X = 1

```
LOCATE R + 2 + X, 41: PRINT INT(pi * precis) / precis
LOCATE R + 3 + X, 41: PRINT INT(Q * precis) / precis
END SUB
```

SUB Boucle

```

CLS
LOCATE 22, 1: PRINT "[1] Sans transferts"
LOCATE 22, 40: PRINT "[2] Avec Transferts"
LOCATE 23, 40: INPUT transfert
t = 1: test1 = 0
FOR i = 1 TO R: alpha(1, i) = alpha(2, i): NEXT i
CALL BoucleEntree
FOR i = 1 TO R: alpha(2, i) = alpha(1, i): NEXT i
END SUB

```

SUB BoucleEntree

```

' Procédure de détermination de la coalition stable.
' Boucle principale : entrée des pays tirés au sort. L'itération cesse lorsque
' la variable test1 est plus grande que Khi, sachant que test1 est incrémentée
' à chaque fois qu'un pays refuse d'adhérer, et remise à zéro à chaque fois
' qu'un pays entre.
RANDOMIZE TIMER
compteur1 = 0
LOCATE 8, 29: PRINT "Nbre de tours :": LOCATE 10, 25: PRINT "Entrées :": LOCATE 10, 40: PRINT "Sorties :"
DO WHILE test1 < Khi
  ' Tirage aléatoire de l'entrant j
  j = INT(RND * R) + 1: CALL StabExterne
  ' S'il entre, test des sorties
  IF alpha(1, j) <> v(j, t - 1) OR Khi - test1 < 5 THEN CALL BoucleSortie
  FOR ii = 1 TO R: v(ii, t) = alpha(1, ii): NEXT ii
  ' Test de stabilité de la coalition : entrée des pays
  ' A chaque fois que la coalition à la fin de la boucle présente est
  ' parfaitement identique à la précédente (tous les alpha(1,i) égaux),
  ' la variable test1 s'incrémenté d'une unité.
  FOR iv = 1 TO R
    IF v(iv, t - 1) = v(iv, t) THEN indice = indice + 1
  NEXT iv
  IF indice = R THEN test1 = test1 + 1 ELSE test1 = 0
  indice = 0: t = t + 1: compteur1 = compteur1 + 1
  IF t = 100 THEN t = 1
  LOCATE 12, 27: PRINT compteur1
  IF compteur1 > 10 ^ 3 THEN
    PRINT "L'itération ne converge pas !": test1 = Khi
  END IF
LOOP
END SUB

```

SUB BoucleSortie

```

' Boucle de sortie des pays membres de l'AIE.
compteur2 = 0
DO WHILE test2 < Khi / 2
  CALL StabInterne
  FOR iii = 1 TO R: v(iii, t) = alpha(1, iii): NEXT iii
  ' Test de stabilité de la coalition : sortie des pays
  ' A chaque fois que la coalition à la fin de la boucle présente est
  ' parfaitement identique à la précédente (tous les alpha(1,i) égaux),
  ' la variable test1 s'incrémenté d'une unité.
  ' Appelé dans SUB BoucleSortie
  FOR iv = 1 TO R
    IF v(iv, t - 1) = v(iv, t) THEN indice = indice + 1
  NEXT iv
  IF indice = R THEN test2 = test2 + 1 ELSE test2 = 0
  indice = 0: t = t + 1: compteur2 = compteur2 + 1
  IF t = 100 THEN t = 1
  LOCATE 12, 42: PRINT compteur2
  IF compteur2 > 10 ^ 2 THEN test2 = Khi
LOOP
test2 = 0
END SUB

```

SUB Calibrages

```

' Calibrage du jeu des chapitres 7 et 8
transfert = 1: CALL ParamDefaut: CALL VectNash
nr = 0: prog = 1: numero = 0
DO WHILE nr < 1 OR nr > 2
  CLS
  LOCATE 8, 20: PRINT "2 possibilités :"
  LOCATE 9, 10: INPUT "Avec [1] ou sans [2] la région \"reste du monde\" ?", nr

```

```

LOOP
DO WHILE numero < 1 OR numero > 3
    CLS : LOCATE 10, 15
    INPUT "Coûts calibrés sur GREEN [1], MR [2] ou RICE [3] "; numero
LOOP
IF nr = 1 THEN R = 6 ELSE R = 5
IF numero = 1 THEN RESTORE 1
IF numero = 2 THEN RESTORE 2
IF numero = 3 THEN RESTORE 3
FOR iv = 1 TO R: READ e(iv), b(iv), c(iv), d(iv), n(iv): NEXT iv
END SUB

SUB ChoixSpec
DO WHILE choice <> 9
    CLS
    LOCATE 21, 1: PRINT "Choix des options générales :"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[1] Paramètre de tolérance"
    LOCATE 22, 40: PRINT "[2] Choix de la spécification"
    LOCATE 23, 1: PRINT "[9] Fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
    IF choice = 1 THEN
        CLS : LOCATE 10, 15
        INPUT "Quel degré de tolérance désirez-vous ? ", Khi
    END IF
    IF choice = 2 THEN CALL Scenario
LOOP
CLS : CALL VectNash: CALL PaiementsNashCoop
END SUB

SUB CoalHomog
' Détermination des coalitions stables internes + profitables homogènes
FOR i = 1 TO R
    j = i: CALL VectNash: alpha(1, j) = n(j)
    FOR ii = 1 TO n(j): CALL StabInterne: NEXT ii
    FOR ii = 1 TO n(j): CALL StabExterne: NEXT ii
    FOR ii = 1 TO R: alpha(2, ii) = alpha(1, ii): NEXT ii
    CALL Fichier1
NEXT i
END SUB

SUB Fichier
' Choix des informations que l'on désire enregistrer
' ouverture du fichier
' ouvert = 1 quand le fichier a bien été ouvert.
IF ouvert <> 1 THEN
    CLS :
    LOCATE 10, 15: INPUT "Entrez le nom du fichier (*.dat) : ", a$
    OPEN a$ FOR OUTPUT AS #1: CLS : ouvert = 1
END IF
DO WHILE choice < 1 OR choice > 3
    CLS
    LOCATE 20, 1: PRINT "[1] A.I.E."
    LOCATE 20, 40: PRINT "[2] Vecteur de Shapley"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[3] Commentaire"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
LOOP
IF choice = 1 THEN CALL Fichier1
IF choice = 2 THEN CALL Fichier2
IF choice = 3 THEN
    ' Ecriture d'un commentaire dans le fichier de sauvegarde
    CLS
    LOCATE 10, 15: PRINT "Tapez votre commentaire (max. 256 caractères)"
    INPUT a$: PRINT #1, a$: CLS
END IF
END SUB

SUB Fichier1
' Sauvegarde des résultats affichés à l'écran
IF transfert = 1 THEN
    CALL Profits
ELSE
    transfert = 1: CALL Profits
    transfert = 2: CALL Profits
END IF

```

```

PRINT #1, "Nombre de régions : "; R,
PRINT #1, "Nombre de pays : "; NT,
PRINT #1, "Paramètre de tolérance : "; Khi
PRINT #1, "Rég", "b", "c", "n", "E",
PRINT #1, "R. coop.", "R. Nash", "N", "R. sig.", "R. F.R.", "qs", "qns"
FOR i = 1 TO R
    PRINT #1, i, INT(b(i) * 100) / 100, INT(c(i) * 100) / 100, n(i),
    PRINT #1, INT(e(i) * 100) / 100,
    PRINT #1, INT(pi1, i) * precis) / precis,
    PRINT #1, INT(pi2, i) * precis) / precis,
    PRINT #1, alpha(2, i),
    IF alpha(2, i) > 0 THEN
        PRINT #1, INT(ps(i) * precis) / precis,
    ELSE
        PRINT #1, ,
    END IF
    IF alpha(2, i) < n(i) THEN
        PRINT #1, INT(pns(i) * precis) / precis,
    ELSE
        PRINT #1, ,
    END IF
    IF alpha(2, i) > 0 THEN
        PRINT #1, INT(Qs(i) * precis) / precis,
    ELSE
        PRINT #1, ,
    END IF
    IF alpha(2, i) < n(i) THEN
        PRINT #1, INT(Qns(i) * precis) / precis
    ELSE
        PRINT #1,
    END IF
NEXT i
PRINT #1, ,
PRINT #1, , "Revenus mondiaux :", INT(PIcoop * precis) / precis,
PRINT #1, INT(PInoncoop * precis) / precis, INT(pi * precis) / precis
PRINT #1, ,
PRINT #1, , "Dépollutions mondiales :", INT(Qcoop * precis) / precis,
PRINT #1, INT(Qnoncoop * precis) / precis, INT(Q * precis) / precis,
PRINT #1,
END SUB

```

SUB Fichier

```

'Sauvegarde dans le fichier de données des imputations de Shapley
PRINT #1, "Gains": PRINT #1, ,
FOR i = 1 TO 5
    PRINT #1, "Pays"; i,
NEXT i
PRINT #1, "Somme"
FOR i = 1 TO 32
    total = 0 : k = i : CALL notations
    FOR ii = 1 TO 5
        PRINT #1, INT(sh(ii, i) * precis) / precis,
        total = total + sh(ii, i)
    NEXT ii
    PRINT #1, total
NEXT i
PRINT #1, : PRINT #1, "Emissions": PRINT #1, ,
FOR i = 1 TO 5
    PRINT #1, "Pays"; i,
NEXT i
PRINT #1, "Somme"
FOR i = 1 TO 32
    total = 0 : k = i : CALL notations
    FOR ii = 1 TO 5
        PRINT #1, INT(Depol(ii, i) * precis) / precis,
        total = total + Depol(ii, i)
    NEXT ii
    PRINT #1, total
NEXT i
END SUB

```

SUB Imputations

```

RESTORE 4
FOR i = 1 TO 32

```

```
somme = 0
FOR iii = 1 TO R
    READ j(iii): IF j(iii) = alpha(1, iii) THEN somme = somme + 1
    NEXT iii
    IF somme = 5 THEN ii = i
NEXT i
ps(j) = sh(j, ii): pns(j) = sh(j, ii)
END SUB
```

SUB InputManuel

'Entrée des valeurs dans le tableau de paramétrage manuel...

```

CLS : NT = 0
LOCATE 17 - R, 12: PRINT "Rég°": LOCATE 17 - R, 22: PRINT "b"
LOCATE 17 - R, 32: PRINT "c": LOCATE 17 - R, 42: PRINT "n"
LOCATE 17 - R, 52: PRINT "E"
FOR i = 1 TO R
    LOCATE i + 17 - R, 11: PRINT i: LOCATE i + 17 - R, 21: PRINT b(i)
    LOCATE i + 17 - R, 31: PRINT c(i): LOCATE i + 17 - R, 41: PRINT n(i)
    LOCATE i + 17 - R, 51: PRINT INT(e(i) * 100) / 100
NEXT i
LOCATE 1, 10: PRINT "Frappez "Enter" pour garder une valeur"
FOR i = 1 TO R
    IF valeur = 0 OR valeur = 1 THEN
        mem = b(i): LOCATE i + 17 - R, 25: INPUT b(i)
        IF b(i) = 0 THEN b(i) = mem
    END IF
    IF valeur = 0 OR valeur = 2 THEN
        mem = c(i): LOCATE i + 17 - R, 35: INPUT c(i)
        IF c(i) = 0 THEN c(i) = mem
    END IF
    IF valeur = 0 OR valeur = 3 THEN
        mem = n(i): LOCATE i + 17 - R, 45: INPUT n(i)
        IF n(i) = 0 THEN n(i) = mem
    END IF
    IF valeur = 0 OR valeur = 4 THEN
        mem = e(i): LOCATE i + 17 - R, 55: INPUT e(i)
        IF e(i) = 0 THEN e(i) = mem
    END IF
    NT = NT + n(i)
NEXT i
PIcoop = 0: PInoncoop = 0: CALL VectNash: CALL PaiementsNashCoop
END SUB

```

SUB InputParam

'Routine d'entrée des paramètres du paramétrage automatique guidé

'Variables : b ; t2 ; c ; t1.

'Ne fonctionne que pour 5 régions : d'où r = 5 par défaut.

prog = 1: IF R <> 5 THEN R = 5

DO WHILE choice <> 9

```

CLS
LOCATE 19, 1: PRINT "[1] Modifier le bénéfice moyen"
LOCATE 19, 40: PRINT "[2] Modifier la dispersion du bénéfice"
LOCATE 20, 1: PRINT "[3] Modifier le coût moyen"
LOCATE 20, 40: PRINT "[4] Modifier la dispersion du coût"
LOCATE 21, 1: PRINT "[5] Choisir le nombre de pays"
LOCATE 21, 40: PRINT "[6] Choisir les émissions non contrôlées"
LOCATE 22, 1: PRINT "[7] Aide"
LOCATE 23, 1: PRINT "[9] Fin"

```

'Présentation de la matrice des régions autour des valeurs centrales b et c.

```

LOCATE 4, 27: PRINT (1 - t1) * c: LOCATE 4, 37: PRINT c
LOCATE 4, 47: PRINT (1 + t1) * c: LOCATE 6, 15: PRINT (1 - t2) * b
LOCATE 6, 25: PRINT "région 1": LOCATE 6, 45: PRINT "région 2"
LOCATE 7, 15: PRINT b: LOCATE 7, 35: PRINT "région 3"
LOCATE 8, 15: PRINT (1 + t2) * b: LOCATE 8, 25: PRINT "région 4"
LOCATE 8, 45: PRINT "région 5"
LOCATE 23, 40: INPUT choice
IF choice = 1 OR b = 0 THEN
    LOCATE 10, 15: INPUT "Entrez b :", b
END IF

```

IF choice = 2 THEN

LOCATE 10, 15: INPUT "Entrez tx de b :", t2
END IF

IF choice = 3 OR c = 0 THEN

LOCATE 10, 15: INPUT "Entrez c :", c
END IF

IF choice = 4 THEN

LOCATE 10, 15: INPUT "Entrez tx de c :", t1
END IF

IF choice = 5 THEN valeur = 3: CALL InputManuel
IF choice = 6 THEN valeur = 4: CALL InputManuel
IF choice = 7 THEN

CLS

PRINT "Dans ce cas de base, on choisit une valeur centrale pour b et c. On choisit un"

```

PRINT "taux de variation autour de cette valeur qui répartit les 5 régions comme suit :"
LOCATE 6, 25: PRINT "(1-t1).c": LOCATE 6, 38: PRINT "c"
LOCATE 6, 45: PRINT "(1+t1).c": LOCATE 8, 15: PRINT "(1-t2).b"
LOCATE 8, 25: PRINT "région 1": LOCATE 8, 45: PRINT "région 2"
LOCATE 9, 18: PRINT "b": LOCATE 9, 35: PRINT "région 3"
LOCATE 10, 15: PRINT "(1+t2).b": LOCATE 10, 25: PRINT "région 4"
LOCATE 10, 45: PRINT "région 5"
SLEEP 20
END IF
' Prise en compte des modification
b(1) = b * (1 - t2): c(1) = c * (1 - t1):
b(2) = b * (1 - t2): c(2) = c * (1 + t1)
b(3) = b: c(3) = c
b(4) = b * (1 + t2): c(4) = c * (1 - t1)
b(5) = b * (1 + t2): c(5) = c * (1 + t1)
LOOP
CLS : CALL PaiementsNashCoop: CALL Profits
END SUB

```

SUB MenuManuel

```

' Menu d'entrée manuelle des paramètres
CLS : prog = 2
DO WHILE choice <> 9
    LOCATE 19, 1: PRINT "Modifier :"
    LOCATE 20, 1: PRINT "[1] tout"
    LOCATE 20, 40: PRINT "[2] les fonctions de bénéfice"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[3] les fonctions de coût"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[4] le nombre des pays"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[5] les émissions non contrôlées"
    LOCATE 22, 40: PRINT "[9] fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
    valeur = choice - 1: IF valeur < 5 THEN CALL InputManuel
    CLS
LOOP
choice = 0: CLS : CALL VectNash: CALL PaiementsNashCoop
END SUB

```

SUB MenuModifGal

```

' Sous-menu : modification des paramètres (bénéfice et coûts ; nbre de pays) ;
'           choix du vecteur de coopération ; précision des résultats.
DO WHILE choice <> 9
    CLS
    LOCATE 20, 1: PRINT "[1] Vecteur de coopération"
    LOCATE 20, 40: PRINT "[2] Cas de base"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[3] Modifier les fonctions"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[4] Options générales"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[5] Précision des résultats affichés"
    LOCATE 23, 1: PRINT "[9] fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
    IF choice = 1 THEN CALL Vecteur
    IF choice = 2 THEN CALL InputParam
    IF choice = 3 THEN CALL MenuManuel
    IF choice = 4 THEN CALL ChoixSpec
    IF choice = 5 THEN
        CLS : LOCATE 10, 15
        INPUT "Entrez le nombre de décimal voulu (0 à 5) : ", precis
        precis = 10 ^ precis
    END IF
LOOP
END SUB

```

SUB notations

```

' Présentation du vecteur de coopération dans les fichiers
total = 0: a$ = "{"
IF aa(1, k) = 1 THEN a$ = a$ + "1"
IF aa(2, k) = 1 THEN a$ = a$ + "2"
IF aa(3, k) = 1 THEN a$ = a$ + "3"
IF aa(4, k) = 1 THEN a$ = a$ + "4"
IF aa(5, k) = 1 THEN a$ = a$ + "5"
a$ = a$ + "}" : PRINT #1, a$,
END SUB

```

SUB PaiementsNashCoop

```

' Tous les pays coopèrent ...

```

```

CALL VectCoop: CALL Profits
FOR i = 1 TO R: pi(1, i) = ps(i): NEXT i
PIcoop = pi: Qcoop = Q
'Aucun pays ne coopère ...
CALL VectNash: CALL Profits
FOR i = 1 TO R: pi(2, i) = pns(i): NEXT i
PINoncoop = pi: QNoncoop = Q
END SUB

SUB ParamDefault
'velues par défaut des paramètres
R = 5: a = 100: b = 1: c = 1: transfert = 1: NT = 100: Khi = 100: precis = 2
FOR i = 1 TO R: b(i) = 1: c(i) = 1: d(i) = 2: e(i) = 1: n(i) = 20: NEXT i
END SUB

SUB Profits
'Calcul des profits de chaque région en fonction
'du vecteur taux de coop. alpha()
pi = 0
FOR j = 1 TO R
    CALL VersSpec
    pi = pi + alpha(1, j) * ps(j) + (n(j) - alpha(1, j)) * pns(j)
NEXT j
END SUB

SUB Scenario
spec = 0: question = 0: valeur = 0
DO WHILE spec < 1 OR spec > 3
    CLS
    LOCATE 19, 1: PRINT "Choix de la spécification :"
    LOCATE 20, 1: PRINT "[1] Spécification N°1"
    LOCATE 20, 40: PRINT "[2] Spécification N°2"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[3] Spécification N°3"
    LOCATE 23, 40: INPUT spec
LOOP
DO WHILE question < 1 OR question > 3
    CLS
    LOCATE 20, 1: PRINT "Souhaitez-vous analyser :"
    LOCATE 21, 1: PRINT "[1] un cas particulier"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[2] une configuration programmée"
    IF spec = 3 THEN LOCATE 22, 1: PRINT "[3] une configuration calibrée"
    LOCATE 23, 40: INPUT question
LOOP
IF question = 1 THEN
    CLS : LOCATE 10, 15
    INPUT "Combien de région considérez-vous (de 1 à 16) ? ", R
    CALL InputManuel
END IF
IF question = 2 THEN CALL InputParam
IF question = 3 THEN CALL Calibrages
END SUB

SUB Shapley
'Calcul de la valeur de Shapley du joueur i dans un jeu à 5 joueurs.
transfert = 1
RESTORE 4
'Lecture des 32 coalitions d'un jeu à 5 joueurs : 2 ^ 5.
'Une coalition s'écrit sous forme binaire : 0 1 0 0 1 signifie
'que les joueurs 2 et 5 font parties de la coalition.
'coalition (0 1 0 0 1) = 0.ps1 + 1.ps2 ... mesure le
'bien-être de la coalition {25}.
FOR i = 1 TO 32
    FOR ii = 1 TO 5
        READ alpha(1, ii): j(ii) = alpha(1, ii)
        aa(ii, i) = alpha(1, ii)
        sh(ii, i) = 0
    NEXT ii
    CALL Profits
    FOR ii = 1 TO 5
        IF alpha(1, ii) = 1 THEN Depol(ii, i) = Qs(ii) ELSE Depol(ii, i) = Qns(ii)
    NEXT ii
    coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) = j(1) * ps(1) + j(2) * ps(2) + j(3) * ps(3) + j(4) * ps(4) + j(5) * ps(5)
    NEXT i
FOR i = 1 TO 32
    AT = 0

```

```

' Coalition a() étudiée pendant le tour i.
' Exemple 1 : 0 0 0 0 0
' Exemple 2 : 1 0 1 0 0
' AT mesure le nombre de joueurs dans la coalition I décrite par a()
' Exemple 1 : AT = 0 ; Exemple 2 : AT = 2
    FOR ii = 1 TO 5: a(ii) = aa(ii, i): AT = AT + a(ii): NEXT ii
    RESTORE 4
    FOR ii = 1 TO 32
        S = 0: S1 = 1: S2 = 1: S3 = 1: nul = 1
    ' Entrée d'une coalition j()
        FOR iii = 1 TO 5: READ j(iii): S = S + j(iii): NEXT iii
        FOR iii = 1 TO S - 1: S1 = S1 * iii: NEXT iii
        FOR iii = 1 TO AT - S: S2 = S2 * iii: NEXT iii
        FOR iii = 1 TO AT: S3 = S3 * iii: NEXT iii
        IF S1 = 0 THEN S1 = 1
        IF S2 = 0 THEN S2 = 1
    ' Dans la Boucle qui suit, à chaque fois qu'un jour appartient
    ' à la coalition a() (coalition I) mais pas à la coalition j() (coalition S),
    ' la variable nul prend la valeur 0 et les valeurs de Shapley des joueurs
    ' ne sont pas incrémentées à ce tour. Ceci implique que la boucle ii
    ' étudie l'imputation à l'intérieur de la coalition I décrite par a().
    ' Exemple 1 : 0 0 0 0 0. Puisqu'il n'y a pas de joueur, nul=0 tout le temps.
    ' La valeur de Shapley n'est donc jamais incrémentée ; quelle que soit la
    ' coalition S décrite par j() qui est tirée : on obtient donc l'imputation 0.
    ' Ce résultat est corrigé en fin de SUB par l'imputation de Nash.
    ' Exemple 2 : 1 0 1 0 0. nul = 0 à chaque fois que la coalition
    ' S décrite par j() contient les joueurs 2, 4 ou 5. Dans ces cas,
    ' la valeur de Shapley n'est pas incrémentée. Dans tous les autres,
    ' les valeurs de Shapley de tous sont incrémentées. Ceci
    ' revient à obtenir l'imputation au sein de la coalition {13}.
    FOR iii = 1 TO 5
        IF j(iii) = 1 AND a(iii) = 0 THEN nul(iii) = 0 ELSE nul(iii) = 1
        nul = nul * nul(iii)
    NEXT iii
    sh(1, i) = sh(1, i) + (S1 * S2 / S3) * (coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) - coalition(0, j(2), j(3), j(4), j(5))) * nul
    sh(2, i) = sh(2, i) + (S1 * S2 / S3) * (coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) - coalition(j(1), 0, j(3), j(4), j(5))) * nul
    sh(3, i) = sh(3, i) + (S1 * S2 / S3) * (coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) - coalition(j(1), j(2), 0, j(4), j(5))) * nul
    sh(4, i) = sh(4, i) + (S1 * S2 / S3) * (coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) - coalition(j(1), j(2), j(3), 0, j(5))) * nul
    sh(5, i) = sh(5, i) + (S1 * S2 / S3) * (coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), j(5)) - coalition(j(1), j(2), j(3), j(4), 0)) * nul
    NEXT ii
    ' Le profit des pays non-membres de la coalition I décrite par a() est leur profit
    ' de free riders. Donc :
        FOR ii = 1 TO 5
            IF a(ii) = 0 THEN alpha(1, ii) = 0 ELSE alpha(1, ii) = 1
        NEXT ii
        CALL Profits
        FOR ii = 1 TO 5
            IF sh(ii, i) = 0 THEN sh(ii, i) = pns(ii)
        NEXT ii
    NEXT i
    transfert = 2
    END SUB

SUB Spec1
z = 0: d = 0: y = 0
FOR iv = 1 TO R: z = z + (n(iv) - alpha(1, iv)) * b(iv) / c(iv): NEXT iv
P = z / (NT + z)
FOR iv = 1 TO R: y = y + alpha(1, iv) * b(iv): NEXT iv
FOR iv = 1 TO R: d = d + alpha(1, iv) * y / c(iv): NEXT iv
' Calcul de la dépollution globale
Q = (a * d * (1 - P) ^ 3) / (NT + d * (1 - P) ^ 2) + a * P
Qs(j) = (1 - P) * ((a - Q) / NT) * (y / c(j)): Qns(j) = ((a - Q) / NT) * (b(j) / c(j))
' calcul des profits
ps(j) = b(j) / NT * (a * Q - (Q ^ 2) / 2) - c(j) / 2 * (((1 - P) * (a - Q) / NT) * (y / c(j))) ^ 2
pns(j) = b(j) / NT * (a * Q - (Q ^ 2) / 2) - c(j) / 2 * (((a - Q) / NT) * (b(j) / c(j))) ^ 2
END SUB
```

```

SUB Spec2
y = 0: Qs = 0: Qns = 0
FOR iv = 1 TO R: y = y + alpha(1, iv) * b(iv): NEXT iv
' Calcul des dépollutions individuelles
Qs(j) = (1 - EXP(-y / c(j))) * e(j): Qns(j) = (1 - EXP(-b(j) / c(j))) * e(j)
' Calcul de la dépollution globale
FOR iv = 1 TO R
```

```

Qs = Qs + alpha(1, iv) * (1 - EXP(-y / c(iv))) * e(iv)
Qns = Qns + (n(iv) - alpha(1, iv)) * (1 - EXP(-b(iv) / c(iv))) * e(iv)
NEXT iv
Q = Qs + Qns
' calcul des profits
ps(j) = b(j) * Q - e(j) * c(j) * (1 - (y / c(j) + 1) * EXP(-y / c(j)))
pns(j) = b(j) * Q - e(j) * c(j) * (1 - (b(j) / c(j) + 1) * EXP(-b(j) / c(j)))
END SUB

SUB Spec3
y = 0: Qs = 0: Qns = 0
FOR iv = 1 TO R: y = y + alpha(1, iv) * b(iv): NEXT iv
' Calcul des dépollutions individuelles
Qs(j) = (y / (d(j) * c(j))) ^ (1 / (d(j) - 1)): Qns(j) = (b(j) / (d(j) * c(j))) ^ (1 / (d(j) - 1))
' Calcul de la dépollution mondiale
FOR iv = 1 TO R
    Qs = Qs + alpha(1, iv) * (y / (d(iv) * c(iv))) ^ (1 / (d(iv) - 1))
    Qns = Qns + (n(iv) - alpha(1, iv)) * (b(iv) / (d(iv) * c(iv))) ^ (1 / (d(iv) - 1))
NEXT iv
Q = Qs + Qns
' Calcul des profits
ps(j) = b(j) * Q - (c(j) * ((y / (d(j) * c(j))) ^ (1 / (d(j) - 1))) ^ d(j))
pns(j) = b(j) * Q - (c(j) * ((b(j) / (d(j) * c(j))) ^ (1 / (d(j) - 1))) ^ d(j))
END SUB

SUB StabExterne
' Test de l'entrée des pays tirés au sort
' w1 est son profit s'il reste free rider
' w2 est son profit s'il entre
' Si w1 > w2, il reste free rider, et inversement
CALL VersSpec
' Profit de j lorsqu'il ne participe pas à l'AIE
w1 = pns(j)
' Si j décide de coopérer, on a :
alpha(1, j) = alpha(1, j) + 1
' ... et son profit est :
IF alpha(1, j) < n(j) + 1 THEN
    CALL VersSpec: w2 = ps(j)
ELSE
    w2 = w1
END IF
IF w2 < w1 OR w2 = w1 THEN alpha(1, j) = alpha(1, j) - 1
IF alpha(1, j) > n(j) THEN alpha(1, j) = n(j)
END SUB

SUB StabInterne
' Test de sortie des pays tirés au sort
' w1 est son profit s'il reste signataire
' w2 est son profit s'il sort
' Si w1 > w2, il reste, et inversement
CALL VersSpec
' Profit de j lorsqu'il participe à l'AIE
w1 = ps(j)
' Si j quitte, on a :
alpha(1, j) = alpha(1, j) - 1
' ... et son profit est :
IF alpha(1, j) > -1 THEN
    CALL VersSpec: w2 = pns(j)
ELSE
    w2 = w1 - 1
END IF
IF w2 < w1 THEN alpha(1, j) = alpha(1, j) + 1
IF alpha(1, j) < 0 THEN alpha(1, j) = 0
END SUB

SUB TabGeneral
' Tableau récapitulatif des paramètres du scénario
CLS
LOCATE 1, 1: PRINT "Rég": LOCATE 1, 7: PRINT "b"
LOCATE 1, 12: PRINT "c": LOCATE 1, 17: PRINT "n"
LOCATE 1, 22: PRINT "R.Coop.": LOCATE 1, 32: PRINT "R.Nash"
LOCATE 1, 42: PRINT "N": LOCATE 1, 47: PRINT "R.Sig."
LOCATE 1, 57: PRINT "R.N.S."
LOCATE 1, 64: PRINT "qs": LOCATE 1, 69: PRINT "qns"

```

```
LOCATE 1, 74: PRINT "E"
FOR i = 1 TO R
    LOCATE i + 1, 1: PRINT i: LOCATE i + 1, 6: PRINT INT(b(i) * 10) / 10
    LOCATE i + 1, 11: PRINT INT(c(i) * 10) / 10: LOCATE i + 1, 16: PRINT n(i)
    LOCATE i + 1, 21: PRINT INT(pi1(i) * precis) / precis
    LOCATE i + 1, 31: PRINT INT(pi2(i) * precis) / precis
    LOCATE i + 1, 73: PRINT INT(e(i) * 10) / 10
NEXT i
X = 0: IF R < 16 THEN X = 1
LOCATE R + 2 + X, 5: PRINT "Rev. mondiaux :"
LOCATE R + 2 + X, 21: PRINT INT(PIcoop * precis) / precis
LOCATE R + 2 + X, 31: PRINT INT(PInoncoop * precis) / precis
LOCATE R + 3 + X, 5: PRINT "Dépol. mond. :"
LOCATE R + 3 + X, 21: PRINT INT(Qcoop * precis) / precis
LOCATE R + 3 + X, 31: PRINT INT(Qnoncoop * precis) / precis
END SUB
```

SUB TestManuel

```

PRINT "Pour ajouter (enlever) un pays à l'AIE, répondez + (-) à la première question."
PRINT "Donnez ensuite le numéro de la région dont provient le pays."
PRINT "Pour terminer, tapez (F)in"
SLEEP 3
DO WHILE a$ <> "F"
    CLS
    FOR i = 1 TO R: PRINT "région "; i, alpha(1, i): NEXT i
    PRINT "[+] Ajouter [-] Enlever [f] Fin", : nu = 0
    DO WHILE nu <> 1
        INPUT a$
        IF a$ = "f" THEN a$ = "F"
        IF a$ = "+" OR a$ = "-" OR a$ = "F" THEN nu = 1
    LOOP
    PRINT "Indice de la région concernée", : j = 0
    IF a$ <> "F" THEN
        DO WHILE j < 1 OR j > R: INPUT j: LOOP
    END IF
    IF a$ = "+" THEN
        CALL StabExterne
        PRINT "S'il adhère, son profit augmente de "; w2 - w1
        IF w2 < w1 OR w2 = w1 THEN
            PRINT "Il préfère rester free rider"
        ELSE
            PRINT "Il a donc intérêt à entrer"
        END IF
        SLEEP 3
    END IF
    IF a$ = "-" THEN
        CALL StabInterne
        PRINT "S'il renonce, son profit augmente de "; w2 - w1
        IF w2 < w1 THEN
            PRINT "Il préfère rester signataire"
        ELSE
            PRINT "Il a donc intérêt à quitter"
        END IF
        SLEEP 3
    END IF
LOOP
END SUB

```

SUB TestStabIteration

```

' Vérification manuelle de la stabilité du résultat de l'itération
DO WHILE choice <> 9
    CLS
    LOCATE 21, 1: PRINT "[1] Test des entrées (Automatique)"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[2] Test des sorties (Automatique)"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[3] Test manuel"
    LOCATE 22, 40: PRINT "[9] Fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
    IF choice = 1 THEN
        CLS
        FOR i = 1 TO R: LOCATE i, 20: PRINT "région "; i, alpha(1, i): NEXT i
        FOR j = 1 TO R: CALL StabExterne: NEXT j
        FOR i = 1 TO R: LOCATE i, 33: PRINT alpha(1, i): NEXT i
        SLEEP 2
    END IF
    IF choice = 2 THEN
        CLS
        FOR i = 1 TO R: LOCATE i, 20: PRINT "région "; i, alpha(1, i): NEXT i
        FOR j = 1 TO R: CALL StabInterne: NEXT j
        FOR i = 1 TO R: LOCATE i, 33: PRINT alpha(1, i): NEXT i
        SLEEP 2
    END IF
    IF choice = 3 THEN CALL TestManuel
LOOP
CLS : FOR i = 1 TO R: alpha(2, i) = alpha(1, i): NEXT i
END SUB

```

SUB VectCoop

```

FOR i = 1 TO R: alpha(1, i) = n(i): alpha(2, i) = n(i): NEXT i
END SUB

```

SUB Vecteur

```

' Choix d'un nouveau vecteur de coopération :
' Nash ; total ; aléatoire ; manuel.
DO WHILE choice <> 9
    CLS
    LOCATE 21, 1: PRINT "[1] Nash"
    LOCATE 21, 40: PRINT "[2] Coopération totale"
    LOCATE 22, 1: PRINT "[3] Vecteur aléatoire"
    LOCATE 22, 40: PRINT "[4] Vecteur manuel"
    LOCATE 23, 1: PRINT "[9] Fin"
    LOCATE 23, 40: INPUT choice
    IF choice = 1 THEN CALL VectNash
    IF choice = 2 THEN CALL VectCoop
    IF choice = 3 THEN
        RANDOMIZE TIMER
        FOR i = 1 TO R: alpha = INT(RND * n(i)): alpha(1, i) = alpha: alpha(2, i) = alpha: NEXT i
    END IF
    IF choice = 4 THEN
        CLS
        FOR i = 1 TO R
            PRINT "Entrez le nombre de signataires de la région "; i;
            INPUT alpha: alpha(1, i) = alpha: alpha(2, i) = alpha
        NEXT i
    END IF
LOOP
END SUB

```

SUB VectNash

```

' Pour remettre à zéro le vecteur de coopération ...
FOR i = 1 TO R: alpha(1, i) = 0: alpha(2, i) = 0: NEXT i
END SUB

```

SUB VersSpec

```

IF spec = 1 THEN CALL Spec1
IF spec = 2 THEN CALL Spec2
IF spec = 3 THEN CALL Spec3
IF transfert = 2 THEN CALL Imputations
END SUB

```

Bibliographie

- Agostini, P., Botteon, M. et Carraro, C.** (1992), «A carbon tax to reduce CO₂ emissions in Europe», *Energy Economics*, 279 - 290.
- AIE** (1994), Les changements climatiques : initiatives des gouvernements, mise à jour 1994 (volume 1), OCDE, Paris, 1994, 235 p.
- Alho, K.** (1992), «Bilateral Transfers and Lending in International Environmental Cooperation», *Environmental and Resource Economics*, 2 : 201 - 220.
- Anderson, K. et Blackhurst, R.** (sous la direction de) (1992), Commerce mondial et environnement, Economica, Paris, 1992, 338 p.
- Arrow, K.J.** (1995), «L'application de l'analyse économique de l'investissement à la lutte contre "l'effet de serre"», *Problèmes économiques*, n°2.456 : 23 - 28.
- Arrow, K.J. et Kurz, M.** (1970), Public Investment, the Rate of Return, and Fiscal Policy, Resources for the Future, Inc., The John Hopkins Press, Baltimore/London, 1970, 218 p.
- Arrow, K.J. et Fisher, A.** (1974), «Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility», *The Quarterly Journal of Economics*, 88 (22) : 312 - 320.
- d'Aspremont, C.A. et Gabszewics, J.J.** (1986), «On the Stability of Collusion», pages 243-264, in Matthewson, G.F. et Stiglitz, J.E. (Eds.), *New Development in the Analysis of Market Structure*, Mac Millan Press, New York, 1986.
- d'Aspremont, C. et Gérard-Varet, L.-A.** (1995), «Mécanismes de choix collectifs et incitations individuelles», *Revue d'économie politique*, 105 (4) : 657 - 679.
- Avenhaus, R.** (1991), «Monitoring the Emissions of Pollutants by Means of the Inspector Leadership Method», pages 241-269, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Ayoub, A.** (1993), «Développement durable : pour qui ?», Cahier de recherche n° 93.09 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Barbera, A.J. et McConnell, V.D.** (1990), «The Impact of Environmental Regulations on Industry Productivity : Direct and Indirect Effects», *Journal of Environmental Economics and Management*, 18 : 50 - 65.
- Barbier, E.B.** (1990), «Alternative Approaches to Economic-Environmental Interactions», *Ecological Economics*, 2 : 7 - 26.
- Barbier, E.B. et Markandya, A.** (1990), «The Conditions for Achieving Environmentally Sustainable Development», *European Economic Review*, 34 : 659 - 669.
- Barbier, E.B., Markandya, A. et Pearce, D.W.** (1990), «Environmental Sustainability and Cost-Benefit Analysis», *Environmental Planning*, 22 (9) : 1259 - 1266.
- Barns, D.W., Edmonds, J.A. et Reilly, J.M.** (1993), «The Edmonds-Reilly-Barns Model», pages 39-54, in OCDE, *Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux*, Paris, 1993, 160 pages.

- Barrett, S.** (1990), «The Problem of Global Environmental Protection», *Oxford Review of Economic Policy*, 6 (1) : 68 - 79.
- Barrett, S.** (1991), «International Environmental Agreements as Games», pages 11-36, Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Barrett, S.** (1992), «Economic Growth and Environmental Protection», *Journal of Environmental Economics and Management*, 23 : 289 - 300.
- Barrett, S.** (1994), «Self-Enforcing International Environmental Agreements», *Oxford Economic Papers*, 46 : 878 - 894.
- Bator, F.M.** (1958), «The anatomy of Market Failure», *The Quarterly Journal of Economics*, 77 : 351 - 379.
- Baumol, W.J.** (1968), «On the Social Rate of Discount», *The American Economic Review*, 58 : 788 - 802.
- Baumol, W. et Oates, W.** (1988), The Theory of Environmental Policy, Cambridge University Press, Cambridge, 1988, 295 p.
- Beaumais, O.** (1994), «La réinterprétation des politiques d'environnement par les modèles», Thèse pour le doctorat de sciences économiques, sous la direction de Zagamé, P., Université de Paris I, 437 p.
- Beaumais, O. et Schubert, K.** (1996), «Les modèles d'équilibre général appliqués à l'environnement : développements récents», *Revue d'économie politique*, 106 (3) : 355 - 380.
- Beddington, J.R., Watts, C. et Wright, W.D.C.** (1975), «Optimal Cropping of Self-reproductive Natural Resources», *Econometrica*, 43 (4) : 789 - 802.
- Benveniste, L.M. et Scheinkman, J.A.** (1979), «On the Differentiability of the Value Function in Dynamic Models of Economics», *Econometrica*, 47 (3) : 727 - 732.
- Berck, P.** (1979), «Open Access and Extinction», *Econometrica*, 47 (4) : 877 - 882.
- Berck, P. et Perloff, J.M.** (1984), «An Open-access Fishery with Rational Expectations», *Econometrica*, 52 (2) : 489 - 506.
- Berckerman, W.** (1992), «Economic Growth and the Environment : Whose Growth ? Whose Environment ?», *World Development*, 20 (4) : 481 - 496.
- Bernheim, B.D. et Ray, D.** (1987), «Economic Growth with Intergenerational Altruism», *Review of Economic Studies*, 54 : 227 - 243.
- Beurier, J.-P.** (1996), «Le droit de la biodiversité», *Revue Juridique de l'Environnement*, 1-2 : 5 - 28.
- Black, J., Levi, M.D. et Mesa, D.D.** (1993), «Creating a Good Atmosphere : Minimum Participation for Tackling the “Greenhouse Effect”», *Economica*, 60 : 281 - 293.
- Blackhurst, R. et Subramanian, A.** (1992), «Coopération multilatérale dans le domaine de l'environnement», pages 305-330, in Anderson, K. et Blackhurst, R. (sous la direction de), *Commerce mondial et environnement*, Economica, Paris, 1992, 338 p.

- Bohm**, P. (1993), «Incomplete International Cooperation to Reduce CO₂ Emissions : Alternative Policies», *Journal of Environmental Economics and Management*, 24 : 258 - 271.
- Botteon**, M. et **Carraro**, C. (1995), «Burden-Sharing and Coalition Stability in Environmental Negotiations with Asymmetric Countries», Working Paper n° 95.05.
- Bovenberg**, A.L. et **de Mooij**, R.A. (1994), «Environmental taxes and labor-market distortions», *European Journal of Political Economy*, 10 : 655 - 683.
- Boyd**, R., **Krutilla**, K. et **Viscusi**, W.K. (1995), «Energy Taxation as a Policy Instrument to Reduce CO₂ Emissions : A Net Benefit Analysis», *Journal of Environmental Economics and Management*, 29 : 1 - 24.
- Brekke**, K.A. (1994), «Net National Product as a Welfare Indicator», *Scandinavian Journal of Economics*, 96 (2) : 241 - 252.
- Brinner**, R.E., **Shelby**, M.G., **Yanchar**, J.M. et **Cristofaro**, A. (1991), «Optimizing Tax Strategies to Reduce Greenhouse Gases Without Curtailing Growth», *The Energy Journal*, 12 (4) : 1 - 14.
- Brunner**, R.D. (1991), «Global climate change : defining the policy problem», *Policy Sciences*, 24 : 291 - 311.
- Burniaux**, J.M., **Nicoletti**, G. et **Oliveira-Martins**, J. (1992a), «GREEN : un modèle pour chiffrer les coûts des mesures de réduction des émissions de CO₂», *Revue Economique de l'OCDE*, 19 : 55 - 102.
- Burniaux**, J.M., **Martin**, J.P. et **Oliveira-Martins**, J. (1992b), «Incidence des distorsions affectant les marchés de l'énergie sur les coûts des mesures de réduction des émissions de CO₂ : Résultats des simulations sur le modèle GREEN», *Revue Economique de l'OCDE*, 19 : 155 - 182.
- Cairncross**, F. (1991), Costing the Earth, The Economist Books, Great Britain, 1991.
- Carraro**, C. et **Siniscalco**, D. (1993), «Strategies for the International Protection of the Environment», *Journal of Public Economics*, 36 (2/3) : 288 - 299.
- Carraro**, C. et **Siniscalco**, D. (1995), «International Coordination of Environmental Policies and Stability of Global Environmental Agreements», Working Paper n° 95.01.
- Cass**, D. et **Shell**, K. (1976), The Hamiltonian Approach to Dynamic Economics, Academic Press, New York/San Francisco/London, 1976, 197 p.
- Cesar**, H.S.J., Control and Game Models of the Greenhouse Effect, Springer-Verlag, 1994, 210 p.
- Chander**, P. et **Tulkens**, H. (1994a), «A Core-Theoretic Solution for the Design of Cooperative Agreements on Transfrontier Pollution», Social Science Working Paper 897, California Institute of Technology.
- Chander**, P. et **Tulkens**, H. (1994b), «A Core of an Economy With Multilateral Environmental Externalities», Working Paper.
- Chapman**, D. and **Drennen**, T. (1990), «Equity and Effectiveness of Possible CO₂ Treaty Proposals», *Contemporary Policy Issues*, 8 (3) : 16 - 28.

- Cheng, L. et Hart, D.** (1983), «The Local Stability of an Open-Loop Nash Equilibrium in a Finite horizon Differential Game», *Journal of Mathematical Economics*, 12 : 139 - 147.
- Chevé, M.** (1997), «Irreversibility of pollution accumulation : new implications for sustainable endogeneous growth», Working Paper, Erasme, Université de Paris I et Ecole centrale de Paris, France.
- Cette, G.** (1994), «Ecotaxe et charges sur les bas salaires», *Futuribles*, 89 : 169 - 172.
- Ciriacy-Wantrup, S.V.** (1952), Resource Conservation : Economics and Policy, University of California Press, Berkeley, 1972 (seconde édition).
- Clark, C.W., Clarke, F.H. et Munro, G.R.** (1979), «The Optimal Exploitation of Renewable Resource Stocks : Problems of Irreversible Investment», *Econometrica*, 47 (1) : 25 - 47.
- Clark, C.W.** (1985), Bioeconomic Modelling and Fisheries Management, A Wiley-Interscience Publication : John Wiley & Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore, 1985, 281 p.
- Clarke, H.R. et Reed, W.J.** (1994), «Consumption / pollution tradeoffs in an environment vulnerable to pollution-related catastrophic collapse», *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18 : 991 - 1010.
- Cline, W.R.** (1991), «Scientific Basis for the Greenhouse Effect», *The Economic Journal*, 101 : 904 - 919.
- Cline, W.R.** (1992), The Economics of Global Warming, Institute of International Economics, Washington, 1992.
- Cline, W.R.** (1994), «Coûts et avantages de la réduction des émissions de gaz à effet de serre : guide pour une analyse des politiques de lutte contre le réchauffement planétaire», pages 93-114, in OCDE, Les aspects économiques du changement climatique, Paris, 1994, 362 p.
- Cochinard, S.** (1995), «L'évolution du concept de coalition en Théorie des jeux», *Revue d'économie politique*, 105 (4) : 633 - 655.
- Cochrane, H. et Cutler, H.** (1994), «The Economics of Sequential Choice Applied to Quasi-option Value», *Journal of Environmental Economics and Management*, 18 : 238 - 246.
- Common, M.S. et Salma, U.** (1992), «Accounting for Australian CO₂ Emissions», *Economic Record*, 68 (200) : 31 - 42.
- Common, M. et Perrings, C.** (1992), «Towards an Ecological Economics of Sustainability», *Ecological Economics*, 6 : 7 - 34.
- Copeland, B.R.** (1990), «Strategic Enhancement and Destruction of Fisheries and the Environment in the Presence of International Externalities», *Journal of Environmental Economics and Management*, 19 : 212- 226.
- Corfee-Morlot, J et Jones, T.** (1992), «Elaboration d'un régime fiscal réalisable pour réduire les émissions de gaz à effet de serre : introduction», pages 15-24, in OCDE, Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe, Paris, 1992, 153 p.
- Cornes, R. et Sandler, T.** (1983), «On Common and Tragedies», *The American Economic Review*, 73 (4) : 787 - 792.

- Crabbe**, P.J. (1984), «Quasi-option value of natural resources», Cahier de recherche n°84-06 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Crabbe**, P.J. (1985), «Gray and Hotelling : A Reply», Cahier de recherche n° 85-05 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Crabbe**, P.J. (1986), «Unpublished Fragments of natural resource Economics and Excerpt from an Autobiography», Cahier de recherche n° 86-01 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Crabbe**, P.J. et **Long**, N.V. (1987), «Entry Deterrence and Overexploitation of the Fishery», Cahier de recherche n° 87.06 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Crabbe**, P.J. (1988), «The Literacy of the natural resource Economist and the Sociology of Natural Resource Economics : Faustmann, Warming, Gray, Hotelling and Ely», Cahier de recherche n° 88-12 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Cropper**, M.L. et **Oates**, W.E. (1992), «Environmental Economics : A Survey», *Journal of Economic Literature*, 30 : 675 - 740.
- Dales**, J.H. (1968), Pollution, Property and Prices, an Essay in Policy Making and Economics, University of Toronto Press, Toronto.
- Daly**, H.E. (1974), «The World Dynamics of Economic Growth : The Economics of Steady States», *The American Economic Review*, 64 (2) : 16 - 21.
- Daly**, H.E. (1990), «Toward Some Operational Principles of Sustainable Development», *Ecological Economics*, 2 : 1 - 6.
- Dasgupta**, P. (1990), «The Environment as a Commodity», *Oxford Review of Economic Policy*, 6 (1) : 51- 67.
- Dasgupta**, P. et **Heal**, G (1974), «The Optimal Depletion of Exhaustible Resources», *Review of Economic Studies*, 41 : 3 - 28.
- Dasgupta**, P., **Gilbert**, R. et **Stiglitz**, J. (1983), «Strategic Considerations in Invention and Innovation : The Case of Natural Resources», *Econometrica*, 51 (5) : 1439 - 1448.
- Dean**, A. (1994), «Coûts des réductions des émissions de CO₂: enseignement des modèles agrégés», pages 25-45, in OCDE, Les aspects économiques du changement climatique, Paris, 1994, 362 pages.
- Dean**, A. et **Hoeller**, P. (1993), «Costs of Reducing CO₂ Emissions : Evidence from Six Global Models», pages 13-38, in OCDE, Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux, Paris, 1993, 160 pages.
- Desaigues**, B. et **Point**, P. (1990a), «Bilans et essais : l'économie du patrimoine naturel : quelques développements récents», *Revue d'économie politique*, 100 (6) : 707 - 785.
- Desaigues**, B. et **Point**, P. (1990b), «Les méthodes de détermination d'indicateurs de valeur ayant la dimension de prix pour les composantes du patrimoine naturel», *Revue économique*, 41 (2) : 269 - 317.

- Dessus**, B. (1996), Energie : un défi planétaire, Belin, Paris, 1996, 160 p.
- Devarajan**, S. et **Weiner**, R.J. (1992), «Are International Agreements to Regulate Global Warming Necessary ?», Cahier de recherche n° 92-08 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Diedrich**, M.E. (1995), «Environmental Resources and the Interest Rate», *Economie Appliquée*, 48 (2) : 161 - 180.
- Dixit**, A. et **Nalebuff**, B. (1991), Thinking Strategically, W.W. Norton & Company, New York/London, 1991, 393 p.
- Dorfman**, R. (1969), «An Economic Interpretation of Optimal Control Theory», *The American Economic Review*, 59 (5) : 817 - 831.
- Dorfman**, R. et **Dorfman**, N.S. (sous la direction de) (1972), Economie de l'environnement, Collection Perspectives de l'économique (dirigée par Schmidt), Calmann-Lévy, Paris, 1972, 315 p.
- Dorfman**, R. (1991), «Protection of the Global Environment : an Immodest Proposal», *World Development*, 19 (1) : 103 - 110.
- Dudek**, D.J. et **LeBlanc**, A. (1990), «Offsetting New CO₂ Emissions : A Rational First Greenhouse Policy Step», *Contemporary Policy Issues*, 8 (3) : 29 - 42.
- Ekaus**, R.S. (1992), «Comparing the Effects of Greenhouse Gas Emissions on Global Warming», *The Energy Journal*, 13 (1) : 25 - 35.
- Eoff**, D. et **Leggett**, J. (1992), «Taxation des émissions : analyse des solutions envisagées à l'agence des Etats-Unis pour la protection de l'environnement», pages 101-108, in OCDE, *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, Paris, 1992, 153 p.
- Faber**, M., **Jöst**, F. et **Manstetten**, R. (1995), «Limits and Perspectives of the Concept of a Sustainable Development», *Economie Appliquée*, 48 (2) : 231 - 249.
- Faber**, M., **Proops**, J., **Ruth**, M. et **Michaelis**, P. (1990), «Economy-Environment Interactions in the Long-Run : A Neo-Austrian Approach», *Ecological Economics*, 2 : 27 - 55.
- Falk**, I. et **Mendelsohn**, R. (1993), «The Economics of Controlling Stock Pollutants : An Efficient Strategy for Greenhouse Gases», *Journal of Environmental Economics and Management*, 25 : 76 - 88.
- Fankhauser**, S. et **Pearce**, W.D. (1994), «Les coûts sociaux des émissions de gaz à effet de serre», pages 75-92, , in OCDE, *Les aspects économiques du changement climatique*, Paris, 1994, 362 pages.
- Farzin**, Y.H. (1984), «The effect of the Discount Rate on Exhaustible Resources», *Journal of Political Economy*, 5 (92) : 841 - 851.
- Farzin**, Y.H. (1992), «The Time Path of Scarcity Rent in the Theory of Exhaustible Resources», *The Economic Journal*, 102 : 813 - 830.
- Farzin**, Y.H. et **Tahvonen**, O. (1996), «Global Carbon Cycle and the Optimal Time Path of a Carbon Tax», *Oxford Economic Papers*, 48 : 515 - 536.
- Faucheux**, S. et **Noël**, J.F. (1992), «Le calcul économique peut-il venir au secours d'une politique de lutte contre l'effet de serre ?», *Revue Française d'Economie*, 7 (1) : 35 - 84.

- Faucheux, S., Froger, G. et Noël, J.F.** (1993), «Quelle hypothèse de rationalité pour le développement soutenable ?», *Economie Appliquée*, 46 (4) : 59 - 103.
- Faucheux, S. et Froger, G.** (1994), «Le “revenu national soutenable” peut-il être un indicateur de soutenabilité ?», *Revue Française d'Economie*, 9 (2) : 3 - 36.
- Faucheux, S. et Noël, J.-F.** (1995), Economie des ressources naturelles et de l'environnement, Armand Colin, Paris, 1995, 350 p.
- Firor, J.** (1990), «The Straight Story about the Greenhouse Effect», *Contemporary Policy Issues*, 8: 3 - 15.
- Fisher, A.C. et Hanemann, W.M.** (1987), «Quasi-Option Values : Some Misconceptions Dispelled», *Journal of Environmental Economics and Management*, 14 : 183 - 190.
- Folmer, H. et Musu, I.** (1992), «Transboundary Pollution Problems, Environmental Policy and international Cooperation : An Introduction», *Environmental and Resource Economics*, 2 : 107 - 116.
- Forster, B.A.** (1973), «Optimal Consumption Planning in a Polluted Environment», *Economic Record*, 49 : 534 - 545.
- Freeman, A.M.** (1977), «Equity, efficiency, and Discounting : the Reasons for Discounting Intergenerational Effects», *Futures*, 9 (5) : 375 - 376.
- Froger, G.** (1992), «Les approches méthodologiques du développement soutenable», *Cahier du C3E*, 101.
- Fudenberg, D et Tirole, J.** (1991), Game Theory, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1991.
- Gabay, D.** (1993), «Modeling the Articulation Between the Economy and the Environment : an introduction to issues, concepts and models in Global Climate Change Economics», pages 67-85, in Diaz, J.I. et Lions, J.-L. (Ed.), *Environment, Economics and their Mathematical Models*, 1993.
- Galopin, Gutman et Maletta**, «Appauvrissement à l'échelle du globe, développement durable et environnement : une perspective théorique», *Revue Internationale des Sciences Sociales*, 121 : 412 - 437.
- Gaskins, D.W. et Weyant, J.P.** (1992), «Model Comparisons of the Costs of Reducing CO₂ Emissions», *The American Economic Review*, 83 (2) : 318 - 323.
- GATT** (1992), Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce : le commerce international 90-91, Genève, 1992.
- Gaudet, G.** (1977), «Ressources non renouvelables et taxation», Cahier de recherche n° 77.06 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Gaudet, G. et Howitt, P.** (1986), «A Note on Interest Rate Uncertainty and the Hotelling Rule of Nonrenewable Natural Resource Depletion», Cahier de recherche n°86.26 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Gilbert, R.J.** (1979), «Optimal Depletion of an Uncertain Stock», *Review of Economic Studies*, 46 : 47 - 57.

- Giraud, P.-N. et Nadaï, A** (1994), «L'impact économique de l'écotaxe : les effets de la taxe carbone-énergie sur l'industrie française», *Futuribles*, 189 : 135 - 153.
- Godard, O.** (1984), «Autonomie socio-économique et externalisation de l'environnement : la théorie néo-classique mise en perspective», *Economie appliquée*, 37 (2) : 315 - 345.
- Godard, O.** (1990), «Environnement, mode de coordination et systèmes de légitimité : analyse de la catégorie de patrimoine naturel», *Revue économique*, 41 (2) : 215 - 241.
- Goodland, R. et Ledec, G.** (1987), «Neoclassical Economics and Principal of Sustainable Development», *Ecological Modelling*, 38 : 19 - 46.
- Gordon, H.S.** (1954), «The Economic Theory of Common Property Resource : the Fishery», *Journal of Political Economy*, 2 : 53 - 72.
- Gottinger, H.W.** (1991), «Economic Models of Optimal Energy Use under Global Environmental Constraints», pages 133-183, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Gottinger, H.W.** (1992), «Optimal Emission Growth When CO₂ Constraints are Critical», *Energy Economics*, 14 (3) : 192 - 199.
- Goudriaan, J.** (1992), «Où va le gaz carbonique ? Le rôle de la végétation», pages 592-606, in La recherche (n° spécial) (1992), L'effet de serre, n° 243.
- Goulder, L.H.** (1995), «Effects of Carbon Taxes in a Economy with Prior Tax Distortions : An Intertemporal General Equilibrium Analisys», *Journal of Environmental Economics and Management*, 29 : 271 - 297.
- Greenaway, D.** (1991), «Economic Aspects of Global Warming : Editorial Note», *The Economic Journal*, 101 : 902 - 903.
- Gregory, K., Matthews, A., Newton, A. et Nind, A.** (1992), «Incidences potentielles d'une taxe sur le carbone et l'énergie au taux de 10 dollars par baril, frappant les émissions de dioxyde de carbone au Royaume-Uni», pages 67-79, in OCDE (1992), *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Grove, T. et Ledyard, J.** (1977), «Optimal Allocation of Public Goods : A Solution to the “Free Rider” Problem», *Econometrica*, 45 (4) : 783 - 809.
- Grubb, M.** (1992a), «The Costs of Climate Change : Critical Elements», Rapport présenté à l'atelier International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), «Costs, Impacts and Possible Benefits of CO₂ Mitigation», Septembre 1992, Laxenburg.
- Grubb, M.** (1992b), «Politiques de l'énergie et effet de serre», pages 616-625, in La recherche (n° spécial) (1992), L'effet de serre, n° 243.
- Hahn, R.W.** (1989), «Economic Prescriptions for Environmental Problems : How the Patient Followed the Doctor's Orders», *Journal of Economic Perspectives*, 3 (2) : 95 - 114.
- Hahn, R.W. et Stavins, R.N.** (1992), «Economic Incentives for Environmental Protection : Integrating Theory and Practice», *The American Economic Review*, 82 (2) : 464 - 468.
- Halkin, H.** (1974), «Necessary Conditions for Optimal Control Problems with infinite Horizons», *Econometrica*, 42 (2) : 267 - 272.
- Hämäläinen, R.P. et Ehtamo, H.K.** (1990), Lectures Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokyo, 1990, 371 p.

- Hanemann, M.W.** (1988), «Information and the Concept of Option Value», *Journal of Environmental Economics and Management*, 15 : 23 - 37.
- Hardin, G.** (1968), «The Tragedy of the Commons», *Science*, 162 : 1243 - 1248.
- Hart, S. et Kurz, M.** (1983), «Endogeneous Formation of Coalition», *Econometrica*, 51 (4) : 1047 - 1064.
- Hartwick, J.M.** (1977), «Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources», *The American Economic Review*, 67 (5) : 972 - 974.
- Hartwick, J.M.** (1978a), «Substitution Among Exhaustible Resources and Intergenerational Equity», *Review of Economic Studies*, 45 (2) : 347 - 354.
- Hartwick, J.M.** (1978b), «Exploitation of many Deposits of an Exhaustible Resource», *Econometrica*, 46 (1) : 201 - 217.
- Hatem, F.** (1990), «Le concept de développement soutenable : une origine récente, une notion ambiguë, des applications p», *Economie Prospective Internationale*, 44.
- Haugland, T., Lunde, T.L. et Roland, K.** (1992), «Examen et comparaisons des taxes sur le CO₂ appliquées dans les pays nordiques», pages 25-53, in OCDE (1992), *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Helfand, G.E.** (1991), «Standards versus Standards : The Effect of Different Pollution Restrictions», *The American Economic Review*, 81 (3) : 622 - 634.
- Helm, D. et Pearce, D.** (1990), «Assessment : Economic Policy towards the Environment», *Oxford Review of Economic Policy*, 6 (1) : 1 - 16.
- Henry, C.** (1974), «Option Values in the Economics of Irrepleceable Assets», *Review of Economic Studies*, 41 : 89 - 104.
- Henry, C.** (1990), «Efficacité économique et impératifs éthiques : l'environnement en copropriété», *Revue Economique*, 41 (2) : 195 - 214.
- Heyes, A.G. et Liston-Heyes, C.** (1995), «Sustainable resource use : the search for meaning», *Energy Policy*, 23 (1) : 1 - 3.
- Hibiki, A., Ono, H. et Morita, T.** (1992), «Les taxes sur le carbone au Japon : analyse et méthode envisageable», pages 83-99, in OCDE (1992), *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Hoël, M.** (1978), «Extermination of Self-reproductive Natural Resources under Competitive Conditions», *Econometrica*, 46 (1) : 219 - 224
- Hoël, M.** (1991a), «Global Environmental Problems : The Effects of Unilateral Actions Taken by one Country», *Journal of Environmental Economics and Management*, 20 (1) : 55 - 70.
- Hoël, M.** (1991b), «Emission Taxes in a Dynamic International Game of CO₂ Emissions», pages 39-68, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Hoël, M.** (1992a), «Carbon Taxes : An International Tax or Harmonized Domestic Taxes», *European Economic Review*, 36 (2) : 400 - 406.

- Hoël, M.** (1992b), «Le rôle d'une éventuelle taxe sur le carbone dans un accord international sur le climat et son élaboration», pages 109-122, in OCDE (1992), *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Hoël, M.** (1993), «Efficient Climate Policy in the Presence of Free Riders», Working Paper n°04.93, Department of Economics, University of Oslo, Memoranda, ISSN 0801-1117.
- Hoël, M.** et **Isaksen, I.** (1993), «Efficient Abatement of Different Greenhouse Gases», Working Paper n°05.93, Department of Economics, University of Oslo, Memoranda, ISSN 0801-1117.
- Hoeler, P.** et **Coppel, J.** (1992), «Les taxes sur le carbone et la politique de l'énergie dans les pays de l'OCDE», *Revue Economique de l'OCDE*, 19 : 183 - 211.
- Hotelling, H.** (1931), «The Economics of Exhaustible Resources», *Journal of Political Economy*, 39 (2) : 137 - 175.
- Houghton, J.T., Jenkins, G.J. et Ephraums, J.J.** (1990), Climate Change : The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, 365 p.
- Howarth, R.B.** (1991), «Intergenerational Competitive Equilibria under Technological Uncertainty and an Exhaustible Resource Constraint», *Journal of Environmental Economics and Management*, 21 : 225 - 243.
- Howarth, R.B. et Norgaard, R.B.** (1990), «Intergenerational Resource Rights, Efficiency, and Social Optimality», *Land Economics*, 66 (1) : 1 - 11.
- Howarth, R.B. et Nogaard, R.B.** (1992), «Environmental Valuation under Sustainable Development», *The American Economic Review*, 82 (2) : 473 - 477.
- Howarth, R.B. et Nogaard, R.B.** (1993), «Intergenerational Transfers and the Social Rate of Discount», *Environmental and Resource Economics*, 3 : 337 - 358.
- Hung, N.M.** (1991a), «Natural Resource, National Accounting and Economic Depreciation : A Rejoinder», Cahier de recherche n° 91.05 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Hung, N.M. et Quyen, N.V.** (1991), «Bilateral Monopoly Dynamic Game and Endogenous Leadership : The case of innovation in resource economics», Cahier de recherche n° 91.01 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Hung, N.M. et Quyen, N.V.** (1992), «On R&D Timing under Uncertainty : The Case of Exhaustible Resource Substitution», Cahier de recherche n° 92.04 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Hung, N.M. et Quyen, N.V.** (1994), Dynamic Timing Decisions Under Uncertainty, Essays on Invention, Innovation and Exploration in Resource Economics, Springer Verlag, 1994, 187 p.
- Hung, N.M. et Sartzidakis, E.S.** (1995), «Emission Permits Trading versus Command and Control in the Presence of Market Imperfections», Cahier de recherche n° 95.02 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.

- Jaffe, A.B. et Stavins, R.N.** (1994), «The Energy Efficiency Gap : What does it mean ?», *Energy Policy*, 22 (10) : 804 - 810.
- Johansson, T.B. et Swisher, J.N.** (1994), «Perspectives sur les modèles “Technico-économiques” : analyses des coûts des réductions des émissions de dioxyde de carbone», pages 45-63, in OCDE, *Les aspects économiques du changement climatique*, Paris, 1994, 362 pages.
- Johnson, B.E.** (1994), «Modeling energy technology choices : Which investment analysis tools are appropriate ?», *Energy Policy*, 22 (10) : 877 - 883.
- Junqueira Lopes, R.M.E.** (1985), L'économie des ressources renouvelables, Economica, Paris, 1985, 145 p.
- Kalt, J.P.** (1989), «Exhaustible Resource Price Policy, International Trade, and Intertemporal Welfare», *Journal of Environmental Economics and Management*, 17 (2) : 109 - 126.
- Le Kama, A.Y.** (1996), «Sustainable Growth, Renewable Resources and Pollution», Working Paper, MAD, Université de Paris I, France.
- Kamien, M.I. et Muller, E.** (1976), «Optimal Control with Integral State Equations», *Review of Economic Studies*, 469 - 472.
- Kamien, M.I. et Schwartz, N.L.** (1981), Dynamic Optimization : The Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management, Elsevier, North Holland, 1981, 329 p.
- Kane, S., Reilly, J. et Tobey, J.** (1992), «An Empirical Study of the Economic Effects of Climate Change on World Agriculture», *Climate Change* 21, pp. 17-35.
- Kaufman, R.K.** (1991), «Limits on the Economic Effectiveness of a Carbon Tax», *The Energy Journal*, 12 (4) : 139 - 144.
- Kennedy, P.W., Laplante, B. et Maxwell, J.** (1990), «Pollution Policy : The Role of Publicly Provided Information», Cahier de recherche n° 90.21 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Kiefer, N.M.** (1988), «Economic Duration Data and Hazard Functions», *Journal of Economic Literature*, 26 : 646 - 679.
- Kiss, A.** (1993), «Le droit international à Rio de Janeiro et à côté de Rio de Janeiro», *Revue Juridique de l'Environnement*, 1 : 45 - 74.
- Kiss, A.** (1996), «Trois années de droit international de l'environnement (1993-1995)», *Revue Juridique de l'Environnement*, 1-2 : 83 - 120.
- Kneese, A.V. et Sweeney, J.L.** (1993), Handbook of Natural Resource and Energy Economics, Volume III, Elsevier, Amsterdam/London/New York/Tokyo, 1993.
- Kolberg, W.C.** (1992), «Approach Paths to the Steady State : A Performance Test of Current Period Decision Rule Methods for Models of Renewable Resources Management», *Land Economics*, 68 (1) : 11 - 27.
- Kolstad, C.D.** (1994), «George Bush versus Al Gore : Irreversibilities in greenhouse gas accumulation and emission control investment», *Energy Policy*, 22 (9) : 771 - 778.
- Koopsman, T.C.** (1974), «Proof for the Case where Discounting Advances the Doomsday», *Review of Economic Studies*, 41 : 117 - 120.

- Krautkraemer**, J.A. (1985), «Optimal Growth, Resource Amenities and the Preservation of Natural Environments», *Review of Economic Studies*, 52 : 153 - 170.
- Krutilla**, K. (1968), «Conservation reconsidered», *The American Economic Review*, 58 (4) : 776 - 786.
- Krutilla**, K. (1991), «Environmental Regulation in an Open Economy», *Journal of Environmental Economics and Management*, 20 (2) : 127 - 142.
- Krutilla**, J.V. et **Cichetti**, C.J. (1972), «Evaluating benefits of Environmental Resources with Special Application to the Hells Canyon», *Natural Resources Journal*, 12 : 1 - 29.
- Kuhn**, H.W. et **Szegö**, G.P. (1990), Differential Games and Related Topics, North-Holland Publishing Company, Amsterdam/London, 1990.
- Kurz**, M. (1968), «Optimal Economic Growth and Wealth Effects», *International Economic Review*, 9 (3) : 348 - 357.
- Lacaze**, D. (1990), Optimisation appliquée à la gestion et à l'économie, Economica, 1990.
- Lambert**, G. (1992), «Les gaz à effet de serre», pages 550-557, in La recherche (n° spécial) (1992), L'effet de serre, n° 243.
- La recherche** (n° spécial) (1992), L'effet de serre, n° 243.
- Larsen**, B. et **Shah**, A. (1994), «Global Tradeable Carbon Permits, Participation Incentives, and Transfers», *Oxford Economic Papers*, 46 : 841 - 856.
- Lave**, L.B. (1990), «Low-Cost Strategies for Coping with CO₂ Emissions Limits : A Comment», *The Energy Journal*, 11 (4) : 61 - 64.
- Leonard**, D. et **Long**, N.V. (1992), Optimal control theory and static optimization in economics, Cambridge University Press, 1992, 352 p.
- Ludema**, R.D. et **Wooton**, I. (1994), «Cross-border Externalities and Trade Liberalization : the Strategic Control of Pollution», *Canadian Journal of Economics*, 27 (4) : 950 - 966.
- Lyster**, S., International Worldlife Law, Grotius, Cambridge, 1985.
- Mahiou**, A. (1992), «Procédures de décision et droit international», *Revue Tiers Monde*, 130 : 430 - 453.
- Mäler**, K.-G. (1974), Environmental Economics : a theoretical Enquiry, The Johns Hopkins Press, Baltimore, 1974.
- Mäler**, K.-G. (1990), «International Environmental Problems», *Oxford Review of Economic Policy*, 6 (1) : 80- 108.
- Mäler**, K.-G. (1991), «Critical Loads and International Environmental Cooperation», pages 71-81, in Pethig, R. (Ed.), Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Manne**, A.S. (1991), «Global 2100 : An Almost Consistent Model of CO₂ Emissions Limits», *Swiss Journal of Economic Statistic*, 127 (2) : 181 - 197.
- Manne**, A.S. (1993), «Global 2100 : Alternative Scenarios for Reducing Carbon Emissions», pages 55-66, in OCDE, Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux, Paris, 1993, 160 pages.

- Manne, A.S. et Richels, R.G.** (1989), «CO₂ Emissions Limits : An Economic Cost Analysis for the USA», *The Energy Journal*
- Manne, A.S. et Richels, R.G.** (1990), «The Cost of Reducing U.S. CO₂ Emissions : Further Sensibility Analysis», *The Energy Journal*, 11 (4) : 69 - 78.
- Manne, A.S. et Richels, R.G.** (1991a), «Global CO₂ Emission Reductions-The Impact of Rising Energy Cost», *The Energy Journal*, 12 (1) : 87 - 107.
- Manne, A.S. et Richels, R.G.** (1991b), «International Trade in Carbon Emission Rights : A Decomposition Procedure», *The American Economic Review*, 81 (2) : 135 - 139.
- Manne, A.S., Mendelsohn, R. et Richels, R.** (1995), «MERGE : A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies», *Energy Policy*, 23 (1) : 17 - 34.
- Markusen, J.R.**, «Cooperative Control of International Pollution and Common Property Resources», *The Quarterly Journal of Economics*, 89 : 618 - 632.
- Martin, Y.** (1994), «Effet de serre, Emploi et fiscalité», *Futuribles*, 89 : 155 - 160.
- Martin, J.P., Burniaux, J.M., Nicoletti, G. et Oliveira-Martins, J.** (1992), «Les coûts des accords internationaux sur la réduction des émissions de CO₂: Résultats des simulations avec le modèle GREEN», *Revue Economique de l'OCDE*, 19 : 103 - 135.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W.D. et Shaw, D.** (1994), «The Impact of Global Warming on Agriculture : A Ricardian Analisys», *The American Economic Review*, 84 (4) : 753 - 771.
- Merrifield, J.D.** (1988), «The Impact of Selected Abatement Strategies on Transnational Pollution, the Terms of Trade, and Factor Rewards : A General Equilibrium Approach», *Journal of Environmental Economics and Management*, 15 (3) : 259 - 284.
- Michaelis, P.** (1994), «On the Economics of Greenhouse Gas Accumulation : A simulation Approach», *European Journal of Political Economy*, 10 : 707 - 726.
- Michan, E.J.** (1977), «Economic Criteria for Intergenerational Comparisons», *Futures*, 9 (5) : 383 - 403.
- Michel, P.** (1982), «On the Transversality Condition in Infinite Horizon Optimal Problems», *Econometrica*, 50 (4) : 975 - 985.
- Michel, P.** (1990), «Some Clarifications on the Transversality Condition», *Econometrica*, 58 (3) : 705 - 723.
- Minster, J.-F. et Merlivat, L.** (1992), «Où va le gaz carbonique ? Le rôle des océans», pages 592-606, in La recherche (n° spécial) (1992), L'effet de serre, n° 243.
- Moisan, F.** (1994), «Une taxe carbone-énergie pour prévenir le réchauffement du climat ?», *Futuribles*, 89 : 121 - 133.
- Montgomery, D.** (1992), «Instauration de droits pour limiter les émissions de gaz à effet de serre», pages 125-154, in OCDE (1992), Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Morgenstern, R.D.** (1991), «Towards a Comprehensive Approach to Global Climate Change Mitigation», *The American Economic Review*, 81 (2) : 140 - 145.
- Moulin, H.**, Théorie des jeux pour l'économie et la politique, Hermann, Paris, 1981, 246 pages.

- Moulin**, H. (1995), «An Appraisal of Cooperative Game Theory», *Revue d'économie politique*, 105 (4) : 618 - 632.
- Myers**, N. (1989), «The Environmental Basis of Sustainable Development», pages 57-68, in Schramm, G. et Warford, J.J. (Ed.), *Environmental Management and Economic Development*, World Bank, The John Hopkins University Press, Baltimore et Londres, 1989, 208 p.
- Narum**, D. (1993), «International cooperation on global warming and the rights of future generations», *Policy Sciences*, 26 : 21 - 40.
- Nicoletti**, G. et **Oliveira-Martins**, J. (1994), «Effets globaux de l'écotaxe européenne», *Revue économique*, 45 (3) : 931 - 946.
- Nordhaus**, W.D. (1974), «Resources as a constraint to growth», *The American Economic Review*, 64 (2) : 22 : 26.
- Nordhaus**, W.D. (1977), «Economic growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem», *The American Economic Review*, 67 (1) : 341 : 346.
- Nordhaus**, W.D. (1991a), «To Slow or not to Slow : The Economics of the Greenhouse Effect», *The Economic Journal*, 101 : 920 - 937.
- Nordhaus**, W.D. (1991b), «A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect», *The American Economic Review*, 81 (2) : 146 - 150.
- Nordhaus**, W.D. (1992a), «An Optimal Transition Path for Controlling the Greenhouse Gases», *Science*, 258 : 1315 - 1319.
- Nordhaus**, W.D. (1992b), «How Much Should we Invest In Preserving Our Current Climate ?», 255 - 299.
- Nordhaus**, W.D. (1993), «Optimal Greenhouse Gas Reduction and Tax Policy in the DICE Model», *The American Economic Review*, 83 (2) : 313 - 317.
- Nordhaus**, W.D. et **Yang**, Z. (1996), «A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies», *The American Economic Review*, 86 (4) : 741 - 765.
- OCDE** (1992), Convention sur les changements climatiques : Aspects économiques de la négociation, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 1992, 109 p.
- OCDE** (1992), Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 1992, 153 p.
- OCDE** (1993), Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 1993, 160 pages.
- OCDE** (1994), NOx/SOx Emissions and Carbon Abatement, Working Paper 89, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 24 p.
- OCDE / IEA** (1994), Les aspects économiques du changement climatique, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique et Agence Internationale de l'Energie, 1994, 362 p.

- OCDE** (1995a), Les “lignes directrices de St-Pétersbourg” sur les fonds pour l’environnement dans la transition vers l’économie de marché, Working Paper 98, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 55 p.
- OCDE** (1995b), Changements climatiques, instruments économiques et distribution des revenus, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris, 1995, 76 p.
- OCDE** (1995c), Les politiques de l’environnement aux Etats-Unis, *Problèmes économiques*, n°2.484 : 24 - 30.
- O'Dell**, S. (1996), «Long Term Energy Demand : Projections of the International Energy Agency», *The Journal of Energy and Development*, 19 (2) : 1 - 31.
- Oliveira-Martins**, J., **Burniaux**, J.M. et **Martin**, J.P. (1992), «Commerce extérieur et efficacité des mesures unilatérales de réduction des émissions de CO₂: Résultats du modèle GREEN», *Revue Economique de l'OCDE*, 19 : 135 - 155.
- Oliveira-Martins**, J., **Burniaux**, J.M., **Martin**, J.P. et **Nicoletti**, G. (1993), «The Cost of Reducing CO₂ Emissions : A Comparison of Carbon Tax Curves with GREEN», pages 67-94, in OCDE, Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux, Paris, 1993, 160 pages.
- Olson**, M. (1971), The Logic of Collective Action, Harvard University Press, Cambridge, 1971.
- Opschoor**, J.B. et **Pearce**, D.W. (Ed.) (1991), Persistent Pollutants : Economics and Policy, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/London/Boston, 1991, 219 p.
- Opschoor**, H. and **van der Straaten**, J. (1993), «Sustainable Development : an Institutional Approach», *Ecological Economics*, 7 : 203 - 222.
- Ossewarde**, M., **Savornin Lohman**, A.F. et **Van der Burg**, T. (1992), «L'utilisation de redevances pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre : la conception de la redevance», pages 155-175, in OCDE (1992), Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Page**, T. (1977), «Discounting and Intergenerational Equity», *Futures*, 9 (5) : 377 - 382.
- Partridge**, E. (1981), Responsability to Future Generations, Prometheus Books, New York, 1981.
- Pearce**, D.W. (1976), «The Limits of Cost-Benefit Analysis as a Guide to Environmental Policy», *Kyklos*, 29 : 97 - 112.
- Pearce**, D.W. (1988), «Economics, Equity and Sustainable Development», *Futures*, 20 (5) : 598 - 605.
- Pearce**, D.W. (1991), «The Role of Carbon Taxes in Adjusting to Global Warming», *Economic Journal*, 101 : 938 - 948.
- Pearce**, D. et **Markandya**, A. (1989), «Marginal Opportunity Cost as a Planning Concept in Natural Resource Management», pages 39-55, in Schramm, G. et Warford, J.J. (Ed.), Environmental Management and Economic Development, World Bank, The John Hopkins University Press, Baltimore et Londres, 1989, 208 p.

- Pearce, D., Markandya, A. et Barbier, E.** (1989), Blueprint for a Green Economy, Earthscan, Londres, 1989.
- Pearce, D. et Turner, A.** (1990), Economics of Natural Resources and the Environment, Harvester Wheatsheaf, Hemel Hempstead, Herst, 1990.
- Peck, S.C. et Teisberg, T.J.** (1992), «CETA : A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment», *The Energy Journal*, 13 (1) : 55 - 77.
- Percebois, J.** (1995), Economie de l'énergie, Collection “Bibliothèque des Matières Premières”, Economica, Paris, 1995.
- Perrings, C.** (1995), «Ecological Resilience in the Sustainability of Economic Development», *Economie Appliquée*, 48 (2) : 121 - 142.
- Perry, A.M.** (1990), «Low-Cost Strategies for Coping with CO₂ Emissions Limits : A Comment», *The Energy Journal*, 11 (4) : 65 - 68.
- Pethig, R. (Ed.)** (1991a), Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Pethig, R.** (1991b), «Problems of Irreversibility in the Control of PMPs», pages 93-103, in Opschoor, J.B. et Pearce, D.W. (Ed.), Persistent Pollutants : Economics and Policy, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1991, 219 p.
- Pezzey, J.** (1989), «Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development», Environment Department Working Paper n°15, World Bank, Whashington D.C.
- Pezzey, J.** (1992), «Sustainability : An Interdisciplinary Guide», *Environmental Values*, 1 : 321 - 362.
- Phelps, E.S. et Riley, J.G.** (1978), «Rawlsian Growth : Dynamic Programming of Capital and Wealth for Intergeneration “Maximin” Justice», *Review of Economic Studies*, 103 - 119.
- Piggot, J., Whalley, J. et Wigle, R.** (1992), «Effets internationaux induits des politiques de réduction des émissions des émissions de carbone», pages 143-162, in Anderson, K. et Blackhurst, R., Commerce mondial et environnement, *Economica*, Paris, 1992, 338 pages.
- Pigou, A.C.** (1920), Economics of Welfare, 4th edition, Macmillan, London, 1932.
- Plourde, C.G.** (1970), «A Simple Model of Replenishable Natural Resource Exploitation», *The American Economic Review*, 60 (3) : 518 - 521.
- Plourde, G.C.** (1972), «A Model of Waste Accumulation and Disposal», *The Canadian Journal of Economics*, 5 : 119 - 125.
- Pontriaguine, L., Boltianski, R., Gamkrelidze, R. et Michtchenko, E.** (1961), Théorie mathématique des processus optimaux, Embarek, D. (trad.), Ed. Mir, 1974.
- Quinet, E.** (1991), «Pour une définition de la notion de coût social de l'environnement», *Economie Appliquée*, 64 (4) : 67 - 77.
- Quyen, N.V.** (1988), «The Optimal Depletion and Exploration of Nonrenewable Resource», *Econometrica*, 56 (6) : 1467 - 1472.

- Quyen**, N.V. (1989), «Exhaustible Resources : A Theory of Exploration», Cahier de recherche n° 89.05 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.
- Radanne**, P. et **Bonduelle**, A. (1994), «Nucléaire, effet de serre : quelle marge de liberté pour la France», *Futuribles*, 89 : 97 - 120.
- Ramsey**, F. (1928), «A Mathematical Theory of Saving», *The Economic Journal*, 38 : 543 - .
- Rawls**, J. (1971), A Theory of Justice, Cambridge, Mass., 1971.
- Reilly**, J. et **Hohmann**, N. (1993), «The Contribution of Economic Modeling to Analysis of the Costs and Benefits of Slowing Greenhouse Warming», *The American Economic Review*, 83 (2) : 306 - 312.
- Reilly**, J.M. et **Richards**, K.R. (1993), «Climate Change Damage and the Trace Gas Index Issue», *Environmental and Resource Economics*, 3 : 41 - 61.
- Repetto**, R. (1989), «Economic Incentives for Sustainable Production», pages 69-86, in Schramm, G. et Warford, J.J. (Ed.), *Environmental Management and Economic Development*, World Bank, The John Hopkins University Press, Baltimore et Londres, 1989, 208 p.
- Revue Juridique de l'Environnement** (1993), «Documents : Convention-Cadre sur les Changements Climatiques (15 mai 1992)», 1 : 117- 138.
- Rist**, A. et **Eggler**, M. (1992), «Aperçu d'une proposition de taxe sur le CO₂ en Suisse», pages 55-64, in OCDE (1992), *Le changement climatique : concevoir un système pratique de taxe*, OCDE, Paris, 1992, 153 p.
- Roe**, T., **Tsur**, Y. et **Zemel**, A. (1994), «Sustainable Growth and Global Climate Change», pages 223-231, in *Symposium international, Modèles de développement soutenable : des approches exclusives ou complémentaires de la soutenabilité*, Volume 1, Paris, 16-18 mars 1994.
- Roth**, A.E. (Ed.) (1988), The Shapley Value, Cambridge University Press, Cambridge, 1988, 330 p.
- Rotillon**, G. (1991), «Ressources épuisables et substitut», *Annales d'économie et de statistique*, 23 : 13 - 33.
- Rutherford**, T. (1993), «The Welfare Effects of Fossil Carbon Restrictions : Results from a Recursively Dynamic Trade Model», pages 95-106, in OCDE, *Les coûts de la réduction des émissions de carbone : résultats tirés des modèles mondiaux*, Paris, 1993, 160 pages.
- Russel**, C.S. (1991), «Monitoring and Enforcement of Pollution Control Laws in Europe and the United States», pages 195-213, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Russel**, C.S. (1991), «Economics of Pollution : Application of Microeconomics Models to Regional Environmental Quality Management», *The American Economic Review*, 63 (2) : 236 - 242.
- Sartzetakis**, E.S. (1993), «Cost-Efficiency and Welfare Comparison of Tradeable Emissions Permits to Command and Control», Cahier de recherche n° 93.21 du Groupe de Recherche en Economie de l'Energie et des ressources Naturelles, Université Laval, Québec.

- Sathaye, J. et Ketoff, A.** (1991), «CO₂ Emissions from Major Developing Countries : Better Understanding the Role of Energy in the Long», *The Energy Journal*, 12 (1) : 161 - 196.
- Schelling, T.C.** (1992), «Some Economics of Global Warming», *The American Economic Review*, 82 (2) : 1 - 14.
- Scheraga, J.D., Leary, N.A., Goettle, R.J., Jorgenson, D.W. et Wilcoxen, P.J.** (1993), «Macroeconomic Modelling and the Assessment of Climate Change Impacts», in IIASA Collaborative Series, Costs, Impacts and Possible Benefits of CO₂ Mitigation, Vol. CP93-2.
- Schleicher, H.** (sous la direction de) (1979), Jeux, information et groupes, Economica, Paris, 1979, 195 p.
- Schubert, K.** (1993), «Les modèles d'équilibre général calculable : une revue de la littérature», *Revue d'économie politique*, 103 (6) : 775 - 825.
- Shogren, J.F., Kyung, H.B. et Crocker, T.D.** (1991), «Environmental Conflicts and Strategic Commitment», pages 85-107, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Schramm, G. et Warford, J.J.** (Ed.), Environmental Management and Economic Development, World Bank, The John Hopkins University Press, Baltimore et Londres, 1989, 208 p.
- Seierstad, A. et Sydsaeter, K.** (1987), Optimal control theory and economic applications, North-Holland, Amsterdam/New-York/Oxford/Tokyo, 1987, 444 p.
- Simonin, J.P.**, «L'équilibre et l'optimum économiques en présence d'effets externes dans la production», Thèse pour le doctorat de sciences économiques, sous la direction de Gabillard, J., 301 p.
- Sin, H.-W.** (1982), «The Economic Theory of Species Extinction : Comment on Smith», *Journal of Environmental Economics and Management*, 9 : 194 - 198.
- Sinclair, P.J.N.** (1994), «On the Optimum Trend of Fossil Fuel Taxation», *Oxford Economic Papers*, 46 : 869 - 877.
- Smith, C., Hall, S. et Mabey, N.** (1995), «Econometric modelling of international carbon tax regimes», *Energy Economics*, 17 (2) : 133 - 146.
- Smith, V.L.** (1977), «Control Theory Applied to Natural and Environmental Resources : An Exposition», *Journal of Environmental Economics and Management*, 4 : 1 - 24.
- Solow, R.M.** (1974), «Intergenerational Equity and Exhaustible Resources», *Review of Economic Studies*, 41 : 29 - 45.
- Solow, R.M.** (1986), «On the Intergenerational Allocation of Natural Resources», *Journal of Environmental Economics and Management*, 8 (4) : 1 - 24.
- Sorin, S.** (1995), «Bluff et réputation», *Revue d'économie politique*, 105 (4) : 583 - 600.
- Tahvonen, O.** (1994), «Carbon dioxide abatement as a differential game», *European Journal of Political Economy*, 10 : 685 - 705.
- Theys, J.** (Sous la direction de), Environnement et gestion de la planète, Cahiers Français n°250, 1991, 129 p.

- Thuillier**, P. (1992), «L'humanité saisie par l'effet de serre», pages 515-521, in *La recherche* (n° spécial) (1992), *L'effet de serre*, n° 243.
- Toman**, M.A., **Pezzey**, J. et **Krautkraemer**, J. (1995), «L'économie néoclassique face à la soutenabilité», *Economie Appliquée*, 48 (2) : 25 - 57.
- Le Treut**, H. et **Kandel**, R. (1992), «Que nous apprennent les modèles du climat ?», pages 572-583, in *La recherche* (n° spécial) (1992), *L'effet de serre*, n° 243.
- Tu**, P.N.V (1992), Dynamical Systems : An Introduction with Applications to Economics and Biology, Springer-Verlag, Berlin, 314 p.
- Ulph**, A. (1991), «The Choice of Environmental Policy Instruments and Strategic International Trade», pages 111-129, in Pethig, R. (Ed.), *Conflicts and Cooperation in Managing Environmental Resources*, Springer-Verlag, 1991, 273 p.
- Ulph**, A. et **Ulph**, D. (1994), «The Optimal Time Path of a Carbon Tax», *Oxford Economic Papers*, 46 : 857 - 868.
- Van der Ploeg**, F. et **De Zeeuw**, A.J. (1992), «International Aspects of Pollution Control», *Environmental and Resource Economics*, 2 : 117 - 139.
- Van der Ploeg**, F. et **De Zeeuw**, A.J. (1994), «Investment in Clean Technology and Transboundary Pollution Control», pages 229-240, in Carraro, C. , *Trade, Innovation, Environment*, Dordrecht, Holland, 1994, 139 p.
- Vellinga**, N. et **Withagen**, C (1999), «On the Concept of Green National Income», *Oxford Economic Papers*, 48 : 499 - 514.
- Victor**, P.A. (1991), «Indicators of Sustainable Development : Some Lessons from Capital Theory», *Ecological Economics*, 4 : 191 - 213.
- Victor**, P.A., **Hanna**, J.E. et **Kubursi**, A. (1995), «How Strong is Weak Sustainability ?», *Economie Appliquée*, 48 (2) : 75 - 94.
- Weitzman**, M.L. (1976), «On the Welfare Significance of National Product in a Dynamic Economy», *The Quarterly Journal of Economics*, 90 : 156 - 162.
- Whalley**, J. et **Wigle**, R. (1991), «Cutting CO₂ Emissions : The Effects of Alternative Policy Approaches», *The Energy Journal*, 12 (1) : 109 - 124.
- Williams**, R.H. (1990), «Low-Cost Strategies for Coping with CO₂ Emissions Limits : A Critic», *The Energy Journal*, 11 (4) : 35 - 59.
- Williams**, M. (1995), «Global Warming and Carbon Taxation : Optimal policy and the role of administration costs», *Energy Economics*, 17 (4) : 319 - 327.
- Winters**, A. (1992), «Quantification de l'incidence de la réduction des gaz à effet de serre sur le commerce international et le bien-être», pages 115-142, in Anderson, K. et Blackhurst, R., *Commerce mondial et environnement*, *Economica*, Paris, 1992, 338 p.
- Worcester**, R.M. et **Corrado**, M. (1992), «Attitudes face à l'environnement : une analyse Nord/Sud», *Revue Tiers Monde*, 130 : 355 - 372.
- World Commission on Environment and Development** (Rapport Brundtland) (1987), Our Common future, Oxford University Press, Oxford.

- Zagamé**, P. (1994), «Fiscalité sur l'énergie : un double dividende écologique et économique», *Futuribles*, 89 : 161 - 167.
- Zhang**, Z.X. et **Folmer**, H. (1996), «The Chinese Energy System : Implications for the Future Carbon Dioxide Emissions in China», *The Journal of Energy and Development*, 21 (1) : 1 - 31.
- Zhou**, L. (1994), «A New Bargaining Set of an N-Person Game and Endogenous Coalition Formation», *Games and Economic Behavior*, 6 : 512 - 526.

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE PRÉLIMINAIRE - L'EFFET DE SERRE	16
1 - L'effet de serre naturel	17
2 - L'effet de serre additionnel	18
3 - Les cycles biogéochimiques des gaz à effet de serre	20
4 - Contributions individuelles aux changements climatiques	23
5 - Résultats des modèles de circulation générale	27
6 - Effets du réchauffement sur la planète	29
6.1 - Des nuisances graduelles	29
6.2 - Des effets catastrophiques	30
7 - Conclusion	31
PARTIE I - POLITIQUE MONDIALE DU CLIMAT	
CHAPITRE 1 - POLLUTION CUMULATIVE	34
1.1 - Production - Pollution cumulative	36
1.1.1 - Résolution	40
1.1.2 - Propriétés qualitatives de la dynamique optimale	47
1.1.3 - Décentralisation	53
1.2 - Production - Pollution cumulative - Ressource épuisable	54
1.2.1 - Résolution	55
1.2.2 - Trajectoires d'épuisement et rente de rareté	56
1.2.3 - Prix implicite de la pollution	58
1.3 - Application numérique	62
1.3.1 - Spécification du modèle	62
1.3.2 - Résolution	64
1.3.3 - Trajectoire sans contrainte d'épuisement	65
1.3.4 - Prix implicite et contrainte d'épuisement	68
1.3.5 - Prix implicite et progrès technique exogène	69
1.4 - Conclusion	71
Annexes	75

CHAPITRE 2 - COÛT DE LA LUTTE CONTRE L'EFFET DE SERRE	82
2.1 - Des moyens d'action multiples	83
2.2 - La consommation d'énergie finale	85
2.2.1 - Historique de la consommation d'énergie	85
2.2.2 - Les déterminants de la demande d'énergie	86
2.3 - Les émissions de carbone	92
2.3.1 - De la consommation d'énergie aux émissions de carbone	92
2.3.2 - Projections des modèles mondiaux	93
2.4 - Résultats des modèles mondiaux	98
2.4.1 - Les déterminants du coût de la dépollution	98
2.4.2 - Evaluations par les modèles mondiaux	102
2.4.3 - Critiques des modèles mondiaux	108
2.5 - Conclusion	113
Annexes	117
CHAPITRE 3 - DOMMAGES CLIMATIQUES	118
3.1 - Construction d'une fonction de dommage climatique	119
3.1.1 - Dommages du doublement de la concentration d'équivalent CO ₂	120
3.1.2 - Fonctions de dommage climatique	128
3.1.3 - Critiques	129
3.2 - Domage par tonne et taxation optimale	132
3.2.1 - Taxe optimale sur le carbone	134
3.2.2 - Comparaison des gaz à effet de serre	137
3.3 - Conclusion	142
Annexes	145
PARTIE II - DISCONTINUITÉS, IRREVERSIBILITÉS ET INCERTITUDES	
CHAPITRE 4 - CATASTROPHES CLIMATIQUES IRRÉVERSIBLES	148
4.1 - Production - Pollution - Catastrophe irréversible	151
4.2 - Résolution	153
4.2.1 - Deux attitudes concurrentes	154
4.2.2 - La meilleure stratégie de préservation	155
4.2.3 - La meilleure stratégie de passage	157
4.2.4 - Laquelle choisir ?	159
4.3 - Interprétations	160
4.3.1 - Acceptabilité de la catastrophe	161
4.3.2 - Délai d'attente	162
4.3.3 - Variation du seuil critique	164

4.4 - Fonction d'héritage	165
4.4.1 - Le bien-être après la catastrophe	165
4.4.2 - A l'instant de passage...	166
4.5 - Application numérique	167
4.6 - Conclusion	170
Annexes	172
CHAPITRE 5 - INCERTITUDES	175
 5.1 - Incertitude sur la gravité de la catastrophe et progrès scientifiques	177
5.1.1 - Aucun progrès scientifique	177
5.1.2 - Progrès scientifiques dans la prévision de la catastrophe	179
5.1.3 - Valeur de quasi-option	186
 5.2 - Incertitude sur l'échéance de la catastrophe	187
5.2.1 - Résolution	189
5.2.2 - Effet de l'incertitude sur l'équilibre stationnaire	190
 5.3 - Conclusion	192
Annexes	195
PARTIE 3 - COMPOSANTES STRATEGIQUES	
CHAPITRE 6 - JEUX DIFFÉRENTIELS DE L'EFFET DE SERRE	198
 6.1 - Production - Pollution avec plusieurs pays	201
6.1.1 - Structures d'information	202
6.1.2 - Stratégies coopératives	204
6.1.3 - Stratégies non coopératives	210
6.1.4 - Coopération et bien-être	214
6.1.5 - Application numérique	215
 6.2 - Résultats des jeux dynamiques appliqués	218
6.2.1 - Les déterminants des taxes domestiques	219
6.2.2 - Politiques unilatérales optimales	221
6.2.3 - Comparaison des politiques unilatérales à la politique coopérative	223
 6.3 - Dilemme du prisonnier et stratégies punitives	226
 6.4 - Conclusion	229
Annexes	232

CHAPITRE 7 - NEGOCIATIONS INTERNATIONALES	234
7.1 - Droit international de l'environnement	236
7.1.1 - Expériences de coopération internationale	236
7.1.2 - La Convention-cadre sur les changements climatiques	238
7.2 - Respect strict des engagements de la Convention	244
7.2.1 - Modèle et calibrages	245
7.2.2 - Situations de référence	249
7.2.3 - Politiques unilatérales de la région O.C.D.E.	250
7.3 - Conclusion	260
Annexes	262
CHAPITRE 8 - COALITIONS	265
8.1 - Coalition : définition et fonctionnement	267
8.2 - Accords Internationaux sur l'Environnement	269
8.3 - Profil des signataires	271
8.3.1 - Aucuns transferts latéraux	271
8.3.2 - Partage des gains	278
8.4 - Conclusion	282
Annexes	284
CONCLUSION GÉNÉRALE	287
Glossaire	296
Appendice 1 : Principe du maximum	297
Appendice 2 : Propriétés du Hamiltonien et de la variable adjointe	300
Appendice 3 - Propriétés du système au voisinage du point stationnaire	302
Appendice 4 - Détermination de la coalition stable et du vecteur de Shapley	303
BIBLIOGRAPHIE	318
ENCADRÉS	
Encadré 1 : Modèle climatique de base	32
Encadré 1.1 : Le développement soutenable	46
Encadré 1.2 : Valeur du taux d'actualisation	52
Encadré 2.1 : Typologie des mesures de lutte contre l'effet de serre	83
Encadré 2.2 : Global 2100 (Manne, 1993)	96
Encadré 2.3 : GREEN (Burniaux & alli, 1992a)	96

