

Chapitre 2 Figures logiques de la décision sous incertitudes

Dans le modèle STARTS que nous avons construit au chapitre précédent, nous avons fait comme si toutes les incertitudes relatives au changement climatique avaient tout à coup été levées. STARTS représente en effet un monde dans lequel le fonctionnement du système climatique, ainsi que les impacts que son évolution peut avoir sur les économies sont parfaitement connus. De même, nous connaissons autant la trajectoire future de l'économie que ses possibilités d'adaptation au changement climatique ou ses capacités de réduction des émissions de GES. Pour calculer la politique climatique la plus efficace pour le bien-être collectif, il ne reste plus dans cet univers Laplacien qu'à égaliser mécaniquement les dommages marginaux du changement climatique avec les coûts marginaux de la protection du climat. Le dessin des politiques climatiques se réduit à un problème, certes complexe, de pure balistique.

Nous commençons dans ce chapitre à nous éloigner de cette métaphore. Nous avons abondamment souligné dans l'introduction que nous sommes loin de posséder une information parfaite. Chacun des maillons de la chaîne qui relie les émissions de GES aux impacts du changement climatique est en effet fortement controversé, tout comme la nature de l'évolution future des économies, ou encore la capacité de celles-ci à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. La majeure partie de nos actions individuelles et collectives sont certes décidées en information imparfaite, mais la combinaison d'un horizon de très long terme et de ces incertitudes font du changement climatique un cas extrême.

Pourtant, malgré les incertitudes scientifiques, malgré l'absence des générations futures à la table de négociation, malgré le fait que le réchauffement climatique reste aujourd'hui une « chimère » dont nous n'avons nulle expérience tangible, il faut aujourd'hui prendre une décision. Dans un contexte aussi complexe, il est d'autant plus remarquable que les économistes du Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat se soient mis d'accord pour recommander l'emploi d'un schéma de décision séquentiel (Arrow *et al.*, 1996b). Ce concept recouvre en réalité trois éléments bien distincts :

- Un calendrier des décisions prenant en compte le fait que de nouvelles informations sur le changement climatique sont susceptibles d'arriver dans le futur. Comme il ne nous est pas possible d'accélérer la vitesse d'acquisition de cette information, la décision devient naturellement « séquentielle » : à chaque étape, l'information supplémentaire qui nous est communiquée nous permet de réviser nos choix en meilleure connaissance de cause.
- Un changement de perspective : seule la première étape de la décision et non la totalité de la trajectoire d'action compte pour le décideur aujourd'hui. Nous verrons pourtant au chapitre 3 que ce rappel de pur bon sens a en fait des conséquences profondes sur la prise en compte des incertitudes.
- Une indication sur la démarche à suivre pour choisir les politiques de première étape : « *The objective of the first step of the decision sequence is to put the society as far as possible in the position to postpone technological or institutional "lock-in" and to use the extra negotiation time to increase options and reach wider consensus on how to approach the more difficult long-term decisions.* » (Arrow *et al.*, 1996b, p.71).

La « décision séquentielle » proposée par le GIEC articule donc trois notions fondamentales : l'incertitude, l'information croissante et la « préférence pour la flexibilité ». Si les deux premières sont relativement naturelles, la troisième est par contre beaucoup plus ambiguë. En effet, l'identification des « *lock-in* » technologiques et institutionnels est difficile. Leur évaluation dépend en effet des représentations de l'inertie et de l'adaptabilité des systèmes technico-économiques, ainsi que des

croyances sur la nature et le rythme du progrès technique futur¹. En second lieu, la simple inertie du capital nous force à chaque instant à prendre des décisions irréversibles, au moins à l'échelle de la première période de la décision. Se situer « loin » de ces impasses n'est donc pas évident. En troisième lieu, se placer « le plus loin possible » de ces culs-de-sac peut s'interpréter de manière maximaliste comme faire tout ce qui est en notre pouvoir techniquement pour les éviter tous, ou de manière plus modeste comme faire tout ce qui est possible compte tenu des autres contraintes économiques pour nous en tenir éloignés².

Pourtant, étant donné que nous sommes susceptibles d'obtenir plus d'information dans le futur, éviter de nous lier les mains apparaît comme un objectif assez naturel. Par ailleurs, les expériences numériques que nous avons menées au chapitre précédent ont souligné toute l'importance de l'inertie du système technico-économique pour l'évaluation des politiques climatiques. A ce stade de la discussion, nous sentons donc bien qu'un aspect important de la discussion sur la distribution temporelle des coûts des politiques climatiques se dissimule derrière la notion de flexibilité. Tout l'objectif de ce chapitre est donc de mieux comprendre la nature de la « préférence pour la flexibilité » évoquée par le GIEC. Il s'agit non seulement d'en comprendre le sens, mais aussi d'en produire une traduction analytique susceptible d'être intégrée à un modèle numérique d'évaluation des politiques climatiques.

Pour ce faire, nous commencerons par examiner ce qui nous apparaît le plus familier dans la décision séquentielle, à savoir la question de l'incertitude et de l'information croissante. La première section sera donc consacrée aux des critères disponibles pour représenter numériquement la prise de décision en univers risqué, c'est-à-dire dans lequel les probabilités d'occurrence des états du monde futurs sont connues *ex ante*. Nous passerons ensuite dans la seconde section à un univers incertain, c'est-à-dire dans lequel ces probabilités sont inconnues. A l'issue de cette discussion, et malgré leurs limites respectives, les critères de maximisation de l'utilité espérée (respectivement de maximisation de l'utilité subjective espérée) nous apparaîtront comme les mieux à mêmes pour représenter des décisions successives sous risques ou sous incertitudes.

Forts de ces informations, nous nous tournerons enfin vers la « préférence pour la flexibilité ». Notre question sera alors de savoir s'il faut rajouter un élément aux critères de décision que nous avons obtenu précédemment pour traduire correctement ce que nous pouvons raisonnablement définir comme la « préférence pour la flexibilité ». Nous verrons en fait qu'un tel ajout n'est pas nécessaire, et que l'utilisation intelligente des critères définis précédemment suffit à faire naturellement apparaître une prime à la flexibilité. Nous illustrerons enfin ce propos avec un exemple directement tiré du débat sur le changement climatique³.

¹ Nous reviendrons plus largement au chapitre 6 sur cette question. Par ailleurs, le lecteur trouvera d'amples développements sur cette question dans les travaux menés au CIRED depuis 1995 Hourcade et Chapuis (1995), Hourcade *et al.* (1996b), Ha-Duong *et al.* (1997), Hourcade (1997), Hourcade (1998).

² Le « principe de préférence pour la flexibilité » développé par le GIEC présente ainsi une évidente filiation avec le principe de précaution. Au-delà des nuances sémantiques se trouve en effet articulé le même jeu de questions : quelle est la nature exacte des contraintes environnementales ou de santé publique mises en avant ? Peut-on les satisfaire toutes ou, dans le cas contraire, comment choisir laquelle transgresser ? Enfin, la satisfaction des contraintes est-elle un impératif absolu ou peut-elle être évaluée au regard d'autres objectifs de politiques publiques, par exemple de développement économique (Godard, 1997, 1999) ?

³ Ce chapitre dans son ensemble doit beaucoup aux deux premiers chapitres de la thèse de Thierry Chapuis (1996) et au *Cours de théorie microéconomique* de Jean-Jacques Laffont (1985). Nous remercions Minh Ha-Duong pour la relecture attentive et pertinente qu'il en a faite.

1. De la décision séquentielle en univers risqué

Depuis l'article fondateur de Knight (1921), un problème de décision est dit en présence de risques si les résultats des différentes actions possibles sont conditionnels à la réalisation d'états de la nature aléatoires dont on connaît *ex ante* la probabilité. Le mot incertitude est réservé au cas où la distribution de probabilité des états du monde possibles est inconnue. Nous nous limitons dans cette première section à l'univers risqué.

Notre objectif est de rechercher un critère de décision qui puisse être généralisé à un schéma de décision répété en information croissante. Nous examinons en premier lieu l'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern dans le cas d'un choix à une seule étape (1.1). Si l'extension de cette théorie aux choix répétés les plus généraux se révèle difficile (1.2), elle reste néanmoins possible sous certaines conditions restrictives dans le cas particulier de la décision en matière climatique (1.3).

1.1. L'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern

Depuis l'origine, la théorie de la décision en univers non certain (qu'elle soit sous risques ou sous incertitudes) se donne pour objet de traduire sous la forme mathématique la plus simple possible des préférences préexistantes sur un ensemble donné d'actes dont les conséquences dépendent de la réalisation d'une variable aléatoire. Tous les résultats que nous allons examiner à partir de maintenant se présentent donc sous la même forme : soit un ensemble donné d'actes dont les conséquences dépendent de la réalisation d'une variable aléatoire, soit une relation de préférence sur ces actes, si cette préférence vérifie tel ou tel jeu de propriétés, alors elle peut être représentée mathématiquement par une fonction qui associe à chaque acte un nombre réel, et telle qu'entre deux actes possibles, le préféré est celui dont le nombre réel associé est le plus grand.

Dans leur ouvrage « *Theory of games and economic behavior* » (1944), John Von Neumann et Oskar Morgenstern définissent d'abord les loteries comme des tirages qui entraînent la réalisation d'un événement x parmi un ensemble X avec une probabilité connue $p(x)$. Ils supposent ensuite un agent capable de faire des choix entre ces loteries. Ils démontrent alors que, si ces préférences vérifient les propriétés de complétude, de transitivité, de continuité faible et d'indépendance, il existe une fonction d'utilité définie à une fonction affine près sur l'espace des événements possibles et telle que la relation de préférences sur les loteries puisse être représentée par l'espérance de l'utilité de la loterie.

La présentation du théorème de Von Neumann et Morgenstern retenue ici est volontairement non technique. La perte de rigueur mathématique nous semble être compensée par une plus grande lisibilité et une plus grande compacité du propos⁴. Précisons simplement la nature des hypothèses formulées sur les préférences. Les deux premières sont essentiellement techniques : la complétude signifie que toutes les loteries sont comparables deux à deux, et la transitivité recouvre le fait que si la loterie p est préférée à p' et p' à p'' , alors p est préférée à p'' .

La continuité (faible) signifie que si p est préférée à p' et si p' est préférée à p'' , alors il existe un réel a compris entre 0 et 1 tel que $a.p + (1-a).p''$ soit indifférent à p' . Ce qui est ici important n'est pas tant la propriété de continuité elle-même que la signification de la loterie composée $a.p + (1-a).p''$. Celle-ci peut en effet être interprétée soit comme une loterie à deux étapes où l'on tire d'abord entre p et p'' avec probabilité a et $1-a$, puis ensuite le résultat de p ou de p'' , soit comme une loterie à une seule étape où l'on tire en une seule fois un événement x avec probabilité $a.p(x) + (1-a).p''(x)$. Le principe d'indifférence entre ces deux loteries formulé ici est aussi appelé axiome de réduction des loteries

⁴ Le lecteur intéressé trouvera dans Arrow (1971) un exposé techniquement complet, ainsi que la preuve du théorème. Il pourra aussi se référer à Luce et Raiffa (1957) pour une présentation nettement plus détaillée et une discussion très fouillée du résultat.

composées : il signifie essentiellement que l'ordre de succession des événements aléatoires ne compte pas, ce qui constitue, comme nous le verrons par la suite, une limitation importante dans le cas de schémas de décisions séquentielles dans lesquels l'information est croissante et les croyances peuvent être révisées.

L'axiome d'indépendance signifie enfin que si la loterie p est préférée à la loterie p' , alors toute combinaison linéaire de p avec une autre loterie $a.p+(1-a).p''$ sera préférée à $a.p'+(1-a).p''$ où a est compris entre 0 et 1. De fait, si l'agent a le choix entre, d'une part, obtenir p ou p'' avec probabilité a et $(1-a)$ et d'autre part obtenir p' ou p'' avec les mêmes probabilités, et s'il préfère la loterie p à la loterie p' , alors il préférera la première loterie composée à la seconde.

Von Neumann et Morgenstern démontrent alors que si les préférences de l'agent sur les loteries vérifient ces quatre propriétés, il existe une alors fonction d'utilité U sur l'espace des loteries définie à une fonction affine près et donnée par la relation (2.1) suivante, où $u(x)$ est l'utilité associée à la loterie qui permet d'obtenir la conséquence x avec probabilité 1.

$$U(p) = \sum_x u(x).p(x) \quad (2.1)$$

Le théorème de Von Neumann et Morgenstern est particulièrement important dans la mesure où il fournit une représentation très simple des préférences. Notons en particulier que les préférences des agents sur l'espace des conséquences et la distribution de probabilité attachée à chacune de ces conséquences sont clairement séparées.

La capacité de ce modèle théorique à rendre compte des comportements réels des agents en situation de choix risqué a cependant été critiquée. De nombreux auteurs, à commencer par Allais (1953) ont en effet mis en évidence des situations dans lesquelles les agents ne font pas des choix cohérents avec ce qu'ils devraient faire si leurs préférences vérifiaient les axiomes de base du théorème de Von Neumann et Morgenstern⁵. Ces observations les ont conduits à développer plusieurs théories alternatives non basées sur la maximisation de l'utilité espérée.

L'exposé de cette controverse théorique dépasse largement le cadre de ce travail. Notons simplement que l'un des nœuds de la discussion concerne précisément la capacité des approches n'utilisant pas l'utilité espérée de générer, une fois étendues à la décision séquentielle, des plans d'action temporellement cohérents⁶.

1.2. Décision séquentielle et préférences induites sur les revenus : l'aporie de Kreps et Porteus

L'axiomatique de Von Neumann et Morgenstern n'est pas *stricto sensu* limitée à des décisions isolées. Elle permet en effet de considérer des choix successifs entre loteries, mais l'axiome de réduction des loteries composées stipule que tous ces choix peuvent se réduire à un seul, et ce indépendamment de leur ordre. Les choix répétés sont donc pris en compte, mais uniquement dans la mesure où l'agent est neutre vis-à-vis de l'ordre et de la date de résolution des incertitudes.

⁵ Le paradoxe de Allais peut être représenté par un exemple très simple. Première question, préférez-vous avoir 10% de chances de gagner 10000 (unités d'utilité) (1) ou 9% de chances de gagner 15000 (2) ? Seconde question, préférez-vous avoir 100% de chances de gagner 10000 (3) ou 90% de chances de gagner 15000 (4) ? La plupart des gens (dont l'auteur) préfèrent (2) à (1), mais (3) à (4).

Or en introduisant la loterie (5) qui donne 0 avec probabilité 100%, nous avons (1) = 0,1.(3)+0,9.(5) et (2) = 0,1.(4)+0,9.(5). Si l'axiome d'indépendance était respecté, alors nous devrions avoir en même temps (1) préféré à (2) et (3) préféré à (4) ou l'inverse.

⁶ Le lecteur trouvera dans Karni et Schmeidler (1991) une large revue récente de la littérature sur le débat entre « maximisateurs de l'utilité espérée » et « non maximisateur de l'utilité espérée ». Machina (1989) propose quant à lui une discussion très fouillée sur les arguments de cohérence temporelle.

Les choses sont plus compliquées lorsque la date de résolution des incertitudes compte (Spence et Zeckhauser, 1972, Drèze et Modigliani, 1972). Pour s'en convaincre, considérons le problème posé par Kreps et Porteus (1979a). Soit un agent qui dispose d'un revenu total R qu'il peut utiliser indifféremment pour financer sa consommation à la première ou à la seconde période. Ses préférences sur les vecteurs de consommation sont données par une fonction d'utilité de Von Neumann et Morgenstern $u(c_1, c_2) = \ln(c_1) + \ln(c_2) + 1$, avec son revenu $R = c_1 + c_2$. Supposons maintenant que le revenu de l'agent ne soit pas délivré en une seule fois, mais en deux traites r_1 à la première période et r_2 à la seconde. L'agent pouvant emprunter ou prêter sur un marché financier à taux nul, nous avons maintenant $r_1 + r_2 = c_1 + c_2$.

Nous supposons maintenant que le revenu de l'agent est aléatoire. Il peut toucher ($r_1=0,5$ $r_2=0,5$) ou ($r_1=0,5$ $r_2=1,5$) avec probabilité $\frac{1}{2}$ pour chacun des deux états du monde possibles. Nous noterons l_1 cette première loterie. Nous supposons en outre que l'incertitude est levée avant que l'agent ne prenne aucune décision. Dans ce premier cas de figure, l'utilité qu'il peut espérer retirer de cette loterie est donnée par l'équation suivante (2.2) ci-dessous, et elle vaut numériquement 0,307. De ce fait, la loterie l_1 est équivalente, en ce sens que l'utilité espérée est la même, à une loterie dégénérée l_2 dans laquelle l'agent recevrait de manière certaine un revenu de la forme ($r_1=0,707$ $r_2=0,707$).

$$U(l_1) = \frac{1}{2} \text{Max}_{c_1, c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 0,5\} + \frac{1}{2} \text{Max}_{c_1, c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 1,5\} \quad (2.2)$$

Supposons maintenant que l'agent se trouve face à la même loterie l_1 , mais que l'incertitude ne soit résolue qu'après le choix de la consommation de première période c_1 . Dans ce cas, l'utilité espérée qu'il peut retirer de la même loterie l_1 est donnée par le programme de maximisation (2.3) suivant, dans lequel le niveau de consommation optimal c_1 est choisi avant la résolution de l'incertitude. L'utilité espérée est bien entendu plus faible et vaut 0,200, ce qui est équivalent à une loterie dégénérée l_3 dans laquelle l'agent recevrait de manière certaine le revenu ($r_1=0,670$ $r_2=0,670$).

$$U(l_1) = \text{Max}_{c_1} \left[\frac{1}{2} \text{Max}_{c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 0,5\} + \frac{1}{2} \text{Max}_{c_2} \{u(c_1, c_2) \mid c_1 + c_2 = 0,5 + 1,5\} \right] \quad (2.3)$$

De fait, la structure de préférence induite par la fonction d'utilité de la consommation u sur les loteries de revenu présente la particularité de dépendre de la date de résolution des incertitudes : il n'est pas indifférent à l'agent que l'incertitude sur son revenu soit levée avant ou après la seconde période⁷. Ces préférences ne vérifient donc pas l'axiome de réduction des loteries composées.

Supposons maintenant que la date de résolution des incertitudes soit fixée une fois pour toute après la décision de consommation de première période. Même dans ce cadre restrictif, les préférences induites sur les loteries de revenu par la fonction d'utilité sur les niveaux de consommation ne vérifient toujours pas l'axiome de réduction des utilités composées. Considérons en effet sous les mêmes hypothèses que précédemment la loterie l_4 qui donne ($r_1=0,5$ $r_2=0,1$) ou ($0,5$ $6,202$) avec probabilité ($\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$). Le lecteur vérifiera que l'utilité espérée de cette loterie est de 0,200 avec la formule (2.3). De fait, les loteries l_1 et l_4 ont la même utilité espérée. Or la loterie l_5 composée avec l_1 et l_4 et donnant ($0,5$ $0,1$) ($0,5$ $0,5$) ($0,5$ $1,5$) ($0,5$ $6,202$) avec probabilité ($\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$) a une utilité espérée de 0,050, utilité nettement plus faible que celle associée aux loteries l_1 ou l_4 .

Ces deux exemples montrent que les préférences induites par les préférences sur la consommation sur les loteries de revenus ne vérifient pas les axiomes de Von Neumann et Morgenstern, et en particulier pas l'axiome de réduction des loteries composées. Dans trois articles successifs, Kreps et Porteus développent un cadre d'analyse plus global permettant de retrouver le confort d'un théorème de représentation à la Von Neumann et Morgenstern sur les loteries de revenus tenant compte de la date de résolution des incertitudes.

⁷ Il s'agit précisément de l'effet « d'épargne de précaution » (*precautionary saving*) mesuré par Kimball (1990).

Ils y parviennent en introduisant des loteries temporelles, c'est-à-dire dans lesquelles la résolution des incertitudes est datée. Ils montrent que si les préférences entre ces loteries répondent à des axiomes simples dérivés « naturellement » de ceux de Von Neumann et Morgenstern, alors ces préférences peuvent être représentées par la maximisation de l'espérance d'une fonction qui dépend de la consommation (1978, 1979b) à la manière de l'équation (2.1). Cependant, le classement des loteries ainsi produit ne correspond en général pas au classement de ces mêmes loteries qui serait induit par la simple maximisation de l'utilité espérée de la consommation (1979a).

Dès lors, l'usage de l'espérance de l'utilité de la consommation pour déterminer le meilleur choix entre loteries portant sur le revenu (comme nous l'avons fait dans les exemples ci-dessus) demande à être examiné avec précaution. Comme l'écrivent les auteurs, « *The use of standard atemporal Von Neumann-Morgenstern preference in any dynamic model must at least be questioned.* » (Kreps et Porteus, 1979a, p.82).

1.3. De l'intérêt de l'hypothèse de maximisation de l'utilité en décision séquentielle

La difficulté de retrouver un théorème de représentation à la Von Neumann Morgenstern sur les loteries de distributions temporelles de revenus constitue un résultat particulièrement contraignant. Il n'est en effet plus possible de légitimer l'usage de l'utilité espérée comme représentation de préférences obéissant à certains axiomes simples. L'usage d'une telle fonction de choix reste possible, mais il doit soit être justifié autrement, soit posé comme une hypothèse *a priori* sur les comportements des agents.

Ce résultat concerne le cas général des choix entre loteries sur les revenus. Nous pouvons néanmoins revenir au théorème de Von Neumann et Morgenstern dans un cas particulier : si la distribution de probabilité sur le revenu de seconde période est donnée, et si l'ordre de résolution des incertitudes est fixé. Ce résultat se démontre de la manière suivante.

Nous nous plaçons à nouveau dans le problème de décision à deux périodes que nous avons étudié à la section précédente. Soit p_i une distribution de probabilités sur le niveau de revenu total R_i . Cette distribution est connue une fois pour toute. Supposons de plus que l'ordre des opérations soit aussi donné, et que la décision de première période doive intervenir avant que l'incertitude sur le revenu total ne soit résolue.

Dans ce contexte, choisir un niveau de consommation de première période c_1 revient à choisir la loterie de plans de consommation $(p_i, (c_1, w_i - c_1))$ parmi l'ensemble des loteries possibles $\{p_i, (c_1, w_i - c_1) \mid c_1 \in [0, \min_i(w_i)]\}$. Le point important est que, la distribution de probabilités étant donnée *ex ante*, cet ensemble de loteries possibles est très restreint. Dans le cas général étudié à la section 1.2 précédente, nous avons d'abord le choix d'une loterie, puis le choix d'un niveau de consommation. Dans le cas simplifié qui nous occupe, il ne subsiste plus que la seconde opération, qui se ramène au problème de décision sous risques standard vu en section 1.1.

En particulier, si la fonction d'utilité de la consommation $u(c_1, c_2)$ est elle-même Von Neumann Morgenstern, alors le meilleur choix est donné par la maximisation de l'espérance de l'utilité :

$$\text{Max}_{c_1} \sum_i p_i \cdot u(c_1, c_{2i}) = \text{Max}_{c_1} \sum_i p_i \cdot u(c_1, w_i - c_1) \quad (2.4)$$

Les hypothèses que nous avons formulées ici sont restrictives, mais elles définissent un cadre utile pour traiter, au moins en partie, de la question de la décision en matière climatique. Nous pouvons en effet considérer que la distribution de probabilité sur les impacts physiques du changement climatique est donnée une fois pour toute. Si nous supposons cette distribution connue (univers risqué), et que la

date de l'information est elle aussi donnée, nous nous trouvons alors dans un cadre logique identique à celui que nous venons de traiter au plan théorique.

En revanche, ce résultat ne constitue qu'une réponse partielle au problème de décision posé par le changement climatique. Les travaux de Kreps et Porteus nous indiquent en effet qu'il faut être très prudent pour toute tentative d'extension de ce schéma à des cas dans lesquels la distribution de probabilités sur les états du monde futurs et la décision de première période ne seraient pas indépendants. Le traitement de toute incertitude endogène, et donc l'évaluation de politiques aussi importantes que les politiques de recherche et développement, demande donc un examen spécifique.

2. De la décision en univers incertain

Nous disposons maintenant d'un critère de décision en présence de risques, c'est-à-dire étant donnée une distribution de probabilités sur les états du monde possibles. Mais que faire lorsque nous ne possédons pas *a priori* cette distribution de probabilité, ce qui est en particulier le cas pour les incertitudes liées au changement climatique ? Nous commencerons par examiner les différents critères de décision qui ont été proposés dans ce cadre de complète ignorance (2.1) avant de les retrouver dans un cadre axiomatique (2.2). Nous discuterons ensuite (2.3) l'axiomatique spécifique de Savage, qui permet de retrouver la maximisation de l'utilité espérée en introduisant un jeu de probabilités subjectives⁸.

2.1. Quatre critères de décision sous incertitudes

Commençons par définir le problème de décision sous incertitudes. De manière analogue au cas de la décision sous risque, nous supposons un agent qui possède une fonction d'utilité u sur un espace C de conséquences possibles. Il doit ensuite choisir une action a dans un ensemble A , sachant que la conséquence de cette action dépend de la réalisation ou du tirage d'un état du monde s parmi un ensemble S .

La littérature économique propose plusieurs critères de décision, initialement sur une base complètement empirique : minimax, maximin, α -critère de Hurwicz, minimax regret, et le principe des raisons insuffisantes. Nous les présentons successivement dans les paragraphes qui suivent.

2.1.1. Maximin et maximax

Le critère du maximin peut être considéré comme un critère relativement « conservateur ». Il consiste à choisir l'action dont l'utilité dans le pire des cas est la plus élevée. Formellement, on choisit :

$$\text{Max}_{a \in A} \text{Min}_{s \in S} u(a(s)) \quad (2.5)$$

Une position polaire consiste à adopter le critère du maximax, particulièrement « optimiste » qui consiste à choisir l'action dont l'utilité dans le meilleur des cas est la plus élevée, soit :

$$\text{Max}_{a \in A} \text{Max}_{s \in S} u(a(s)) \quad (2.6)$$

Il est possible d'adresser à ces deux critères des critiques symétriques. Ils indiquent en effet les actions uniquement en fonction de la pire (respectivement de la meilleure) des conséquences possibles, en ignorant complètement les autres.

⁸ Nous suivons ici l'ordre d'exposition de Luce et Raiffa (1957, chapitre 13).

Cette propriété peut déboucher sur des décisions *a priori* discutables. Pour illustrer ce point, considérons le problème de décision sous incertitudes (2.7) ci-dessous. Les actions de l'ensemble des choix A sont notées horizontalement, et les états du monde possibles (les éléments de l'ensemble S) sont notés verticalement. Le chiffre à l'intersection de la ligne a_i et de la colonne s_j est la conséquence (mesurée en utilité) du choix de l'action a_i si l'état du monde s_j se réalise. Dans le problème de décision sous incertitudes ci-dessous, l'action a_1 est préférée à l'action a_2 par le critère du maximin quel que soit la valeur de $x > 0$, ce qui peut sembler contre-intuitif si x est très élevé.

$$\begin{array}{cc} & s_1 & s_2 \\ a_1 & \left[\begin{array}{cc} 0 & x \end{array} \right] \\ a_2 & \left[\begin{array}{cc} 1 & 1 \end{array} \right] \end{array} \quad (2.7)$$

2.1.2. α -critère de Hurwicz

Entre ces deux approches extrêmes, Hurwicz (1951) propose une voie médiane, dans laquelle chaque acte est indicé par la moyenne pondérée de l'utilité entre la pire et de la meilleure des conséquences. Notons α ($0 \leq \alpha \leq 1$) le coefficient de pondération, le α -critère s'écrit alors :

$$\text{Max}_{a \in A} \{ \alpha \cdot [\text{Min}_{s \in S} u(a(s))] + (1-\alpha) \cdot [\text{Max}_{s \in S} u(a(s))] \} \quad (2.8)$$

Cette seconde voie n'est cependant pas exempte, elle non plus, de défaut. Elle présente en effet la désagréable caractéristique de ne pas considérer comme optimale une action qui serait une loterie entre deux autres actions elles-mêmes optimales. L'exemple ci-dessus, dû à Luce et Raiffa (1957), le montre bien : si $\alpha = 0,25$, alors les actions a_1 et a_2 sont affectées de la même valeur ($0,25x + 0,75 \cdot 1 = 0,75$) alors que l'action a_3 , qui n'est autre qu'une loterie entre les actions a_1 et a_2 , est affectée d'une valeur plus faible ($0,25x + 0,75 \cdot 0,5 = 0,5$).

$$\begin{array}{cc} & s_1 & s_2 \\ a_1 & \left[\begin{array}{cc} 0 & 1 \end{array} \right] \\ a_2 & \left[\begin{array}{cc} 1 & 0 \end{array} \right] \\ a_3 & \left[\begin{array}{cc} 0,5 & 0,5 \end{array} \right] \end{array} \quad (2.9)$$

2.1.3. Critère de Minimax-Regret

Ce critère a été proposé par Savage (1951) dans le but d'améliorer le critère du maximin⁹. Le point central de cette méthode consiste à écrire à partir de la matrice de conséquences (en utilité) une matrice des « regrets » définis pour chaque état s_j comme la différence entre l'utilité de la meilleure conséquence qui puisse advenir dans cet état et l'utilité de la conséquence de l'acte a_i considéré. On choisit ensuite l'acte a_i dont le « regret » maximum est minimal. Soit formellement,

$$\text{On définit } r_{ij} = [\text{Max}_k u(a_k(s_j)) - u(a_i(s_j))] \text{ la matrice des regrets} \quad (2.10)$$

$$\text{Puis } \text{Min}_i \text{Max}_j r_{ij} \quad (2.11)$$

Si le critère du minimax regret permet d'éliminer les résultats « paradoxaux » obtenus avec le critère du maximin, il présente lui aussi des défauts. Le plus important d'entre eux est le fait que l'ordre de préférences entre deux alternatives peut changer par simple élimination de l'ensemble des actes possibles d'une troisième alternative pourtant dominée par les deux autres, comme l'illustre l'exemple (2.12) ci-dessous.

⁹ Le lecteur en trouvera une application au cas du changement climatique dans Loulou et Kanudia (1997).

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 10 & 0 & 5 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 10 & 2 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 1 & 4 & 10 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.12)$$

Si les trois actions a_1 , a_2 et a_3 sont possibles, alors la matrice des regrets est la suivante :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 10 & 5 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 0 & 8 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 9 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.13)$$

De fait, le critère du minimax-regret classe les actions de la manière suivante : $a_2 > a_3 > a_1$. Or si nous éliminons maintenant l'action 1 de l'ensemble des actions possibles, nous obtenons maintenant le problème de décision :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_2 \begin{bmatrix} 5 & 10 & 2 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 1 & 4 & 10 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.14)$$

Dont la matrice des regrets est maintenant :

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \\ a_3 \begin{bmatrix} 4 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.15)$$

Ce qui entraîne le classement suivant $a_3 > a_2$.

2.1.4. Principe de symétrie (« critère des raisons insuffisantes »)

Ce critère a été formulé pour la première fois par Jacob Bernouilli. Il stipule qu'en situation de complète ignorance, il faut postuler une distribution *a priori* de probabilités égale pour chaque état du monde possible.

L'application de ce critère bute cependant sur la question de l'identification des états du monde futurs, comme l'illustrent les deux problèmes de décision suivants. Dans le premier cas, les actions 1 et 2 sont indifférentes, alors que dans le second, l'action a_1 est préférée à a_2 .

$$\begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \text{ et } \begin{array}{c} s_1 \quad s_2 \quad s_3 \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.16)$$

2.2. Axiomatique de la décision sous incertitudes

Le rapide tour d'horizon qui précède n'est pas de nature à rassurer. Aucun des critères précédemment présentés n'apparaît exempt de défaut. De plus, leur usage donne dans la majeure partie des cas des résultats très contrastés. Dans la présente sous-section, nous nous proposons de changer de point de vue en éliminant la fonction d'utilité sur l'espace des conséquences, et en ne conservant que la donnée d'une structure de préférence sur l'ensemble des actes possibles. Nous examinons ensuite les propriétés simples que peuvent raisonnablement vérifier ces préférences, et essayons d'en déduire ensuite les critères qui y répondent. L'axiomatique présentée est celle développée par Milnor (1954) puis reformulée par Luce et Raiffa (1957).

2.2.1. 10 axiomes encadrant les préférences

Axiome 1 : Tout problème de décision sous incertitudes a au moins une solution.

Axiome 2 : L'ensemble des meilleurs choix d'un problème de décision sous incertitudes est indifférent à toute transformation affine de la fonction d'utilité.

Axiome 3 : L'ensemble des meilleurs choix est invariant à un changement de dénomination des éléments de S.

Axiome 4 : Si a appartient à l'ensemble des meilleurs choix, et si a' est préféré ou indifférent à a , alors a' appartient aussi à l'ensemble des meilleurs choix.

Axiome 5 : Tout élément de l'ensemble des meilleurs choix est non dominé, en ce sens qu'il n'existe pas d'acte a' vérifiant $u(a'(s_i)) \geq u(a(s_i))$ pour tout i avec une inégalité stricte pour au moins un état.

Axiome 6 : Si un acte n'est pas optimal pour un problème de décision sous incertitudes, alors il ne peut être rendu optimal en ajoutant de nouveaux actes. De plus, un acte optimal ne peut devenir non optimal que si l'un des nouveaux actes est optimal.

Axiome 7 : Ajouter une constante à toutes les utilités des conséquences générées par un même état du monde ne change pas l'ensemble des meilleurs choix.

Axiome 8 : L'ensemble des meilleurs choix est convexe.

Axiome 9 : L'ensemble des meilleurs choix d'un problème de décision sous incertitudes ne dépend pas de la manière dont les états du monde sont étiquetés.

Axiome 10 : Retrancher à un problème de décision sous incertitudes une colonne répétée (c'est-à-dire un état du monde qui, pour chaque acte, entraîne les mêmes conséquences qu'un autre) ne change pas l'ensemble des meilleurs choix.

Commençons par quelques commentaires propres à chaque condition. Les axiomes 1 à 4 sont essentiellement techniques. Les imposer ne change pas fondamentalement le problème posé. L'axiome 5 est relativement naturel pour un économiste, puisqu'il constitue une forme de condition de Pareto¹⁰. L'axiome 6 est une formulation possible de la condition d'indépendance : l'accepter exclut le critère du minimax regret. L'axiome 7 est une propriété moins intuitive, qui exclut, si elle est acceptée, le α -critère et le critère du minimax. L'axiome 8 est une propriété de convexité qui exclut le α -critère ainsi que le maximax.

Notons que ces 8 premiers axiomes sont compatibles (le principe des raisons insuffisantes par exemple y répond), mais qu'ils excluent les minimax, maximax, minimax regret et α -critères. Luce et Raiffa montrent le théorème suivant :

Théorème 2.1 (Luce et Raiffa, 1957) : Soit une relation de préférence sur les actes qui satisfait les axiomes 1 à 8, il existe alors une distribution de probabilité *a priori* sur les états du monde telle que si un acte est optimal pour la relation de préférence, alors il est aussi optimal contre cette distribution de probabilité *a priori*.

Il est important de noter que le théorème 2.1 ne stipule pas que tous les actes optimaux contre la distribution de probabilités *a priori* soit optimaux pour le critère retenu. Mais il fournit une indication précieuse sur la forme du critère proposé.

¹⁰ En ne considérant plus un seul individu ayant à choisir des choix dont les conséquences dépendent de l'état du monde, mais N individus fictifs identiques ($N = \text{Card}(S)$) qui vont chacun vivre dans l'état du monde s_i .

Les axiomes 9 et 10 pris ensemble définissent quant à eux la situation de complète ignorance. Notons que s'ils sont compatibles entre eux, ils ne le sont pas avec les axiomes 1 à 8. Comme dans le cas précédent, il existe un théorème de représentation :

Théorème 2.2 (Arrow, 1953) : Toute relation de préférence sur les actes qui satisfait les axiomes 1, 3, 4, 6¹¹, 9 et 10 peut être représentée par une fonction qui ne dépend que des conséquences extrêmes associées à chaque acte.

En particulier, maximax, maximin et α -critères satisfont les hypothèses de ce théorème.

La caractérisation qui précède n'est pas suffisante pour choisir un critère, mais elle permet de mieux comprendre les hypothèses implicites sur lesquelles ils reposent.

2.3. La contribution de Savage

Le théorème 2.1 nous donne une indication précieuse sur la nature des critères de décision sous incertitudes, du moins sur ceux qui ne se placent pas d'emblée dans la situation d'ignorance complète de la probabilité d'occurrence des différents états du monde, c'est-à-dire qui rejettent les axiomes 9 et 10. Ce théorème nous indique en effet qu'une fois acceptés les axiomes 1 à 8, il est possible de trouver une distribution de probabilité *a priori* telle que, si un acte est optimal au sens de la relation de préférence, alors il l'est contre la distribution de probabilité.

L'ensemble des actes optimaux n'étant par hypothèse pas modifié si l'ensemble des actes est agrandi (axiomes 3 à 7), le jeu de probabilités est propre aux états du monde eux-mêmes. Il est possible de déterminer ces probabilités au moyen de petits problèmes de décision sous incertitudes à deux états du monde. Pour que cette distribution de probabilité résume ensuite l'ensemble du critère de décision, il est nécessaire d'ajouter des conditions de cohérence entre les choix entre deux états du monde, et les choix avec l'ensemble des états. C'est précisément l'esprit des travaux de Savage (1954) qui démontre le théorème de représentation suivant.

Théorème 2.3 (Savage, 1954) : Soit une relation de préférence sur l'ensemble des actes d'un problème de décision sous incertitudes. Si cette relation vérifie 7 axiomes de référence¹², alors il existe :

- Une unique fonction P définie sur l'ensemble des événements (ensemble des parties mesurables de S) vérifiant $P(E) \geq 0$ pour tout E , $P(S) = 1$, si E et E' sont disjoints, $P(E \cup E') = P(E) + P(E')$ et $P(E) \leq P(E')$ si et seulement si E n'est pas plus probable que E' .

- Une fonction réelle u définie à une transformation affine positive près sur l'espace des conséquences telle que si E_i ($i=1,2,\dots,n$) et E'_j ($j=1,2,\dots,m$) sont deux partitions de S , et si l'acte A a pour conséquences c_i sur E_i et pour conséquences c'_j sur les E'_j , alors A est préféré à A' si et seulement si

$$\sum_{i=1}^n u(c_i).P(E_i) \geq \sum_{j=1}^m u(c'_j).P(E'_j) \quad (2.17)$$

La fonction P est appelée distribution de probabilité subjective. La fonction u est la fonction d'utilité de l'agent considéré.

¹¹ Il s'agit en fait d'une version légèrement plus forte de l'axiome 6 : ajouter un nouvel acte à un problème de décision sous incertitudes ne change pas un acte non optimal en acte optimal. De plus, de deux choses l'une : (i) soit tous les actes anciennement optimaux restent optimaux, (ii) soit aucun des actes anciennement optimaux ne reste optimal.

¹² Nous ne présentons pas ici ces axiomes dans un souci de concision. Le lecteur trouvera dans Savage (1954) ou dans Luce et Raiffa (1957) un exposé complet du théorème.

Le théorème de Savage est une extension de la théorie de Von Neumann et Morgenstern au cas de la décision sous incertitudes. Il génère en effet *en même temps* une fonction d'utilité et une distribution de probabilité *a priori* telle que les préférences de l'agent puissent être représentées par la maximisation (subjective cette fois-ci) de l'utilité espérée.

2.4. Quelle figure logique pour la décision en matière de changement climatique ?

Les résultats qui précèdent nous montrent que selon le jeu d'axiomes initial que nous utilisons pour caractériser nos préférences, le critère de décision en univers incertain change de manière radicale. Dans un cadre de complète ignorance sur les distributions de probabilité des événements futurs, le choix ne dépend finalement que des conséquences les plus extrêmes de chaque événement (théorème 2.2). L'intervalle entre le pire et le meilleur des cas est en effet la seule information certaine qui nous soit donnée. Lorsque cette hypothèse somme toute restrictive est levée, et lorsque les préférences vérifient quelques propriétés raisonnables, le théorème de Savage nous montre par contre que les agents prennent leurs décisions sous incertitudes en faisant implicitement comme s'ils attribuaient à chaque état du monde possible une probabilité subjective d'occurrence.

D'un point de vue opérationnel pourtant, l'utilisation du critère de l'espérance de l'utilité subjective est rendue difficile par la question de la détermination des probabilités *a priori* sur lesquelles vont être fondées le calcul. Le théorème de Savage indique en effet uniquement que si nos préférences obéissent à une certaine cohérence interne, alors nous choisissons dans l'incertain comme si nous maximisions une utilité espérée. Mais il reste muet sur la manière dont on peut exhiber ces probabilités avant que la décision ne soit prise. Nous nous trouvons dans une situation analogue à celle de la valeur d'option qui revêt, selon le mot d'Olivier Favereau, une forme paradoxale : soit est utile mais se révèle impossible à calculer, soit ne sert à rien mais est alors calculable (1991, p.80).

Cette critique est d'autant plus importante que, contrairement au point de vue commode adopté dans cette première partie, la décision est prise non pas par un seul, mais par une multiplicité d'agents dont les anticipations et les croyances diffèrent. Nous verrons en outre plus loin que les agents peuvent être amenés à manipuler stratégiquement ces probabilités pour favoriser la décision qui sert le plus leurs intérêts (Allais, 1953).

Faudrait-il dès lors revenir à un critère autre que la maximisation de l'utilité espérée ? Un tel changement de perspective présenterait l'intérêt de réduire le nombre de paramètres encore indéterminés, et en particulier d'esquiver le choix de probabilités subjectives. Mais cette opération présente aussi deux défauts majeurs. En premier lieu, elle s'opère au prix d'un abandon soit de l'information partielle disponible sur les incertitudes (maximax, minimax et α -critères en général), soit de l'hypothèse d'indépendance (minimax regret). En second lieu, l'incertitude sur les probabilités d'occurrence des différents états du monde futur constitue une donnée irréductible du problème climatique. Nous verrons plus loin que dans ce cadre, la coordination sur les différents futurs possibles constitue l'enjeu central de la discussion. Dans ce contexte, le choix de critères plus simples risque de créer une illusion d'optique dangereuse en masquant ce qui constitue au contraire la clé de la discussion.

S'il doivent permettre d'apporter un peu de rationalité dans le débat, les modèles, et en particulier les critères de décision en univers incertain sur lequel ils se fondent, doivent être capables de traduire les conflits entre anticipations et croyances contradictoires à propos de l'effet de serre. Dans ce cadre, le critère de maximisation de l'espérance de l'utilité subjective constitue un choix raisonnable. Il permet en effet de représenter explicitement les croyances par les probabilités subjectives. En second lieu, il distingue logiquement les énoncés relatifs aux états du monde futur, les probabilités, des énoncés relatifs aux préférences des agents et inscrites dans la fonction d'utilité.

3. De la préférence pour la flexibilité

Munis de ces critères, nous pouvons maintenant revenir à la « préférence pour la flexibilité ». La question qui se pose, et à laquelle nous allons tenter de répondre dans cette troisième et dernière section, est de savoir dans quelle mesure le classement des choix que ces critères sont susceptibles de produire traduit effectivement une « préférence pour la flexibilité », ou s'il faut y rajouter un élément supplémentaire pour prendre correctement en compte de la flexibilité.

3.1. Critère de maximisation de l'utilité espérée et « préférence pour la flexibilité »

3.1.1. Maximisation de l'utilité espérée : un critère dominant dans la littérature

Depuis les travaux de Henry (1974) et de Arrow et Fischer (1974), la théorie économique reconnaît qu'ajouter des incertitudes dans un problème de décision rend en général plus attractives qu'elles ne l'étaient en univers certain les actions qui préservent la flexibilité. Cet « effet d'irréversibilité » a progressivement été généralisé à toutes les situations de décision présentant à la fois des incertitudes et une information croissante. Relativement au critère de décision qu'ils utilisent, ces travaux peuvent être divisés en deux grandes catégories :

- Les premiers ont pour objet de montrer que « l'effet d'irréversibilité » ne peut être correctement mis à jour que par une analyse coûts avantages qui tienne explicitement compte de l'incertitude. Les travaux de Henry (1974) et Arrow et Fisher (1974) visaient ainsi à disqualifier la technique des équivalents certains, qui revient précisément à esquiver la question de l'incertitude en ramenant tous les flux incertains à une valeur certaine. Si cette première catégorie recouvre la plupart des travaux les plus anciens consacrés à la décision sous incertitudes, la structure logique de comparaison entre « sans » et « avec » prise en compte des irréversibilités se retrouve dans des papiers plus récents (Ha-Duong, 1998a par exemple).
- Les travaux de la seconde catégorie utilisent directement le critère de maximisation de l'utilité espérée, et essaient de préciser la direction et l'intensité de « l'effet d'irréversibilité », dans le domaine de l'environnement (Kolstad, 1996, Gollier *et al.*, 1997 ou Ha-Duong, 1998b) ou dans l'étude plus générale des décisions d'investissement sous incertitudes (Pindyck, 1991). Nous constatons ainsi que la majorité de la littérature accepte la maximisation de l'utilité espérée, obtenue récursivement en commençant par les décisions les plus lointaines dans le temps, comme un « bon » critère de décision.

Il serait abusif de tirer argument de cette apparente unanimité pour appuyer le fait que le critère de la maximisation de l'utilité espérée serait le mieux à même de prendre en compte la prime à la flexibilité qui apparaît en situation d'incertitudes et d'information croissante. Il nous semble par contre plus justifié d'en retenir l'idée suivante : le critère de maximisation de l'utilité espérée n'induit pas *a priori* de biais substantiel dans la prise en compte de l'effet d'irréversibilité.

3.1.2. Le théorème de Kreps

Un théorème de représentation très élégant démontré par David Kreps en 1979 vient appuyer cet argument. Supposons un agent placé devant un choix séquentiel. Dans une première étape, il doit choisir un ensemble de choix parmi un ensemble d'ensembles, puis dans un second temps choisir un élément de l'ensemble initialement retenu. Le lecteur peut par exemple imaginer qu'il doit choisir aujourd'hui un restaurant, puis demain un plat dans la carte dudit établissement. Alors les deux propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i) Les préférences de l'agent sur les ensembles de choix vérifient (a) Tout ensemble x contenant l'ensemble x' est préféré à x' (i.e. si l'agent a une préférence sur l'ensemble qui lui assure le choix le plus important) et (b) Si le choix de x est indifférent à celui de $x \cup x'$, alors pour tout x'' , le choix de $x \cup x''$ est indifférent à celui de $x \cup x' \cup x''$.
- (ii) Il existe un ensemble fini S et une fonction U du produit $X \times S$ dans R (où X est l'ensemble des choix finaux) tel que les préférences de l'agent sur les ensembles de choix x soient représentées par la fonction v :

$$v(x) = \sum_s [\max_{z \in X} U(z,s)] \quad (2.18)$$

De plus, S est un singleton si et seulement si l'agent est totalement neutre vis-à-vis de la flexibilité, c'est-à-dire si ses préférences vérifient x préféré à x' implique x indifférent à $x \cup x'$. Dans le cas contraire, i.e. si l'agent a, en au moins un point, une préférence stricte pour la flexibilité (il préfère strictement $A \cup B$ à A même si A est préféré à B), alors S a au moins deux éléments.

Dans son article, Kreps insiste principalement sur l'implication (i) \Rightarrow (ii), qui constitue un théorème de représentation de la préférence pour la flexibilité. En revenant au problème du restaurant, cette implication peut s'interpréter de la manière suivante. Dire qu'entre deux restaurants dont la carte du premier est plus large que la carte du second, je préfère le premier, revient à dire que je ne suis pas certain de mes préférences. Mais c'est la réciproque qui nous intéresse principalement ici : faire des choix en maximisant la somme espérée de l'utilité sur au moins deux états du monde distincts implique naturellement une préférence pour la flexibilité, au sens d'une préférence pour l'option dont les solutions sont les plus larges.

De fait, il ne semble en théorie pas nécessaire d'adjoindre au critère de maximisation de l'utilité espérée un mécanisme supplémentaire de préférence pour la flexibilité. Cependant, nous avons défini ici cette notion de manière très générale, et il convient maintenant d'examiner dans quelle mesure ces réflexions peuvent être adaptées au cas du changement climatique, qui présente de multiples sources d'irréversibilités, ou de diminution de la flexibilité, potentielles (dépenses d'abattement irrécupérables, « lock-in » techniques ou institutionnels, structurations de l'architecture des villes et des réseaux de transports, etc.). Pour ce faire, nous examinons une application directe au cas de la décision de première période en matière climatique.

3.2. Une première leçon des débats sur le « timing » de l'action face au réchauffement climatique : le rôle clé de l'articulation incertitude – inertie

Nous avons déjà souligné au chapitre 1 l'importance de l'incertitude pour l'élaboration des politiques climatiques. Mais nous avons aussi remarqué que cette importance découle de la présence d'inerties dans les systèmes climatiques et économiques. Sans inertie en effet, sauter d'une trajectoire d'émissions à une autre en fonction de nouvelles informations pourrait se faire rapidement et sans coûts excessifs. Mais dès lors que, dans un secteur donné, la localisation des activités, les comportements ou les équipements dont la durée de vie est la plus longue sont structurés autour en un système cohérent, toute diminution importante des émissions, surtout si elle doit se faire rapidement, entraîne des coûts de transition élevés.

Dès 1995, Hourcade et Chapuis ont exploré la traduction de cet argument sur le « timing » optimal de l'action face au réchauffement climatique. Ils insistent sur la nécessité d'un équilibre entre une action trop précoce qui s'avèrerait trop importante si la concentration atmosphérique en CO_2 se révèle finalement pouvoir atteindre un niveau élevé, et une action trop tardive qui nous placerait devant les coûts très élevés d'un abattement accéléré en cas de surprise climatique défavorable. Les auteurs

illustrent cet arbitrage par la métaphore automobile suivante : « *A driver on a mountain pass road in late winter speculating about the presence of ice on a bend before a precipice [...] wants to maximize his speed, but [...] the risks are too high, and the useful information about the ice [will] come too late given the inertia of the car. Consequently, his behavior is not to adopt once and for all an optimized trajectory but to release the accelerator pedal and to push slightly on the brake, ready to slow down if, as he proceeds, he sees ice in the bend or to accelerate if the road proves clear.* » (p.434).

En 1996, le débat rebondit de manière spectaculaire avec la publication du papier de Wigley, Edmonds et Richels (1996) qui suggèrent qu'une politique de réduction des émissions anticipée n'est pas la manière la plus efficace de rester sous un seuil de concentration atmosphérique en CO₂ de 550 ppm. Retarder l'action, affirment-ils, permet en effet d'éviter le renouvellement prématuré du capital, de tirer profit des technologies non émettrices futures et, en transférant les coûts dans le futur, d'obtenir un coût total actualisé plus faible. Malgré les précautions prises par ses auteurs, ce papier est souvent interprété comme défendant une position attentiste, alors même qu'il devrait simplement aider à comprendre la distinction logique entre réduction des émissions et action : du fait de l'inertie, il peut en effet s'avérer nécessaire d'agir très vite, par exemple en développant la recherche et développement, afin de pouvoir réduire les émissions dans le futur.

Sans réfuter cet argument de « flexibilité temporelle », Ha-Duong, Grubb et Hourcade (1997) utilisent le critère de maximisation de l'utilité espérée pour montrer que traiter la cible de 550 ppm de manière stochastique et non plus déterministe implique des réductions des émissions sensiblement plus élevées à court terme du fait de l'interaction entre l'inertie et l'incertitude. Ils développent pour ce faire le modèle DIAM (Grubb *et al.*, 1995), modèle d'optimisation des trajectoires de réduction des émissions de CO₂. Ce modèle est en particulier caractérisé par le fait que les coûts d'abattement dépendent à la fois du niveau de réduction (x) et de la vitesse de cet effort (x') (2.19). Le paramètre c_a traduit les coûts d'ajustements permanents alors que c_b représente les coûts transitoires. Le terme $\sqrt{c_a/c_b}$, qui a la dimension d'un temps, peut ainsi être interprété comme la durée de renouvellement du capital au sein du système énergétique global.

$$C(x, x', t) = \frac{E_{\text{industrielle}}(t)}{E_{\text{industrielle}}(0)} [c_a x^2 + c_b x'^2] e^{-rt} \quad (2.19)$$

Dans sa version stochastique, le modèle DIAM fait l'hypothèse que l'information sur la valeur exacte du « bon » niveau de concentration (450, 550 ou 650 ppm) ne sera disponible qu'en 2020. Pour déterminer la trajectoire d'abattement optimale jusqu'à cette date, le modèle utilise le critère de la maximisation de l'utilité espérée en accordant *a priori* la même probabilité aux trois plafonds de concentration possibles. Nous retrouvons ici un problème de décision à deux périodes conceptuellement équivalent à celui que nous avons développé dans la section 2.2.

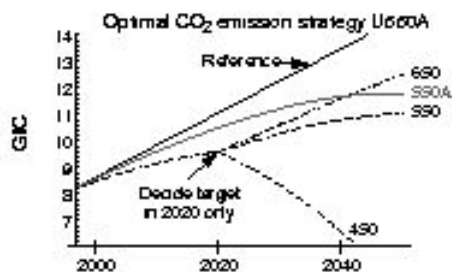


Figure 2.1 : Comparaison entre la décision optimale de court terme maximisant l'espérance de l'utilité (probabilité d'occurrence 1/3 1/3 1/3 pour les plafonds 450, 550 et 650 ppm) et les trajectoires optimales visant dès aujourd'hui l'un de ces trois seuils. (tiré de Ha-Duong *et al.*, 1997).

La comparaison entre la trajectoire optimale d'abattement 2000-2020 obtenue en maximisant l'utilité espérée et les trajectoires certaines correspondants respectivement aux trois plafonds est présenté sur

la figure 2.1. Elle fait apparaître que le niveau de réduction des émissions optimal en 2020 est plus faible que le niveau de réduction des émissions à la même date sur la trajectoire visant directement 550 ppm. Numériquement, le niveau optimal d'abattement en 2020 passe ainsi de 7% à 14% (taux d'actualisation de 5%). Les coûts élevés générés après 2020 si la concentration devait être stabilisée à 450 ppm l'emportent donc devant les risques de réduire les émissions à l'excès avant 2020 si la concentration s'avère finalement devoir être stabilisée à 650 ppm¹³.

L'utilisation d'un critère de maximisation de l'utilité espérée permet ainsi de mettre en évidence l'importance du jeu entre incertitude et inertie pour la décision de court terme. Le modèle fait en effet apparaître un niveau d'abattement plus élevé en 2020 dans le cas où 550 ppm est considéré comme une cible incertaine que dans le cas certain correspondant. Cet écart traduit l'intérêt qu'il y a à préserver plus de flexibilité (et donc de possibilité de réduire les émissions fortement après 2020) dès lors que nous tenons compte du fait que de l'information supplémentaire est susceptible d'arriver dans le futur. Nous n'avons pourtant introduit ici aucune préférence pour la flexibilité supplémentaire : le résultat découle uniquement de la représentation correcte des trois éléments constitutifs du problème de décision : l'incertitude, l'information croissante et l'inertie.

Conclusion

La notion de « décision séquentielle » introduite par le GIEC (Arrow *et al.*, 1996b) est à la fois un changement de perspective faisant porter l'accent sur la décision de court terme, un calendrier séquentiel des décisions, et un objectif de préférence pour la flexibilité. L'essentiel de notre attention aura été consacrée dans ce chapitre à ces deux derniers éléments, dont nous avons recherché une traduction analytique susceptible d'être intégré dans les modèles climatiques. Chemin faisant, le critère de maximisation de l'utilité espérée s'est imposée, sous risques comme sous incertitudes, comme l'outil le plus raisonnable pour un tel objectif. Deux commentaires s'imposent pourtant sur ce choix.

En premier lieu, la représentation d'un schéma de décision répété à l'aide de la maximisation de l'utilité espérée soulève des difficultés théoriques liées au fait que les axiomes de Von Neumann et Morgenstern sont très vite violés. Le problème simple du choix de la décision optimale de court terme étant donnée une distribution de probabilité sur les dommages du changement climatique et une date d'arrivée de l'information qui nous occupe ici échappe heureusement à cette critique. Mais toute analyse générale dans laquelle, par exemple, la date d'arrivée de l'information serait endogène au modèle requiert un retour approfondi sur la théorie.

En second lieu, nous n'avons pas introduit de préférence spécifique pour la flexibilité. La simple prise en compte de l'incertitude couplée au fait qu'il y a inertie et information croissante produit naturellement une décision d'abattement de court terme plus ambitieuse. Cette décision traduit non pas une « préférence pour la flexibilité » que formuleraient *a priori* les agents, mais résulte simplement de arbitrage entre coûts et bénéfices dans les différents cas de figure possibles. Ce constat, qui ne fait que reprendre l'analyse formulée dès 1974 par Henry appelle deux remarques :

¹³ Une autre manière d'illustrer cet argument consiste à examiner les conséquences d'un début des efforts de réduction des émissions en 2020. Le coût de ce retard reste modeste si le « bon » niveau de concentration s'avère finalement être 550 ppm. Il devient par contre très élevé pour un plafond de 450 ppm. La prédominance des risques de coûts si la concentration s'avère devoir être limitée à 450 ppm s'avère d'autant plus importante que la date de résolution des incertitudes est plus éloignée dans le temps : le taux de réduction des émissions optimal en 2020 passe ainsi à 20% si l'information n'arrive qu'en 2035. Cet effet se révèle enfin fortement corrélé avec le degré d'inertie du système socio-économique : doubler le degré d'inertie entraîne un doublement du coût du retard, alors que celui-ci devient négligeable si la durée de vie du capital est supposée inférieure à 10 ans.

- D'abord, il n'apparaît pas nécessaire d'introduire de paramètre *ad hoc* pour faire émerger une prime à la flexibilité. D'un point de vue logique, la « préférence pour la flexibilité » ne disqualifie en rien les outils de l'analyse économique standard.
- On pourra certes considérer que cette prime est insuffisante, et développer des outils supplémentaires pour « tirer » les décisions vers le plus flexible. Il nous semble cependant réfléchir à la plus ou moins grande flexibilité nécessite d'abord de représenter correctement les éléments : inertie, incertitude, et information croissante. Au-delà de la définition de la valeur d'option, c'est à notre sens le cœur du Claude Henry et de Arrow et Fisher.

Terminons en rappelant que choisir un critère de décision sous incertitudes ne constitue en aucun cas une manière de faire disparaître l'incertitude. L'incertitude est simplement reportée sur le choix des probabilités subjectives d'occurrence des différents états du monde possibles. Il constitue simplement une représentation un peu plus pertinente de la manière dont les agents prennent leurs décisions en univers incertain. Toute la question est maintenant d'étudier dans quelle mesure ces incertitudes influent sur la décision de court terme en matière d'effet de serre. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le chapitre suivant.