

Éléments sur l'actualisation et l'environnement

Katheline Schubert*

EUREQua, Université de Paris 1

1 Introduction

Il n'est nul besoin de rappeler à quel point le choix d'un taux d'actualisation est important dans l'évaluation de projets. Mais ce choix est d'autant plus crucial que l'horizon sur lequel porte le projet est long, ce qui explique pourquoi la discussion sur le taux d'actualisation approprié a connu un regain de vigueur à propos de projets à caractère environnemental caractérisés par un très grand éloignement dans le temps des coûts et/ou des bénéfices, réduits à un niveau insignifiant par l'actualisation. Il en est ainsi par exemple en ce qui concerne les projets destinés à contrôler l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ou en limiter les effets, ou ceux qui ont trait au stockage des déchets nucléaires, ou encore ceux concourant à la préservation de la biodiversité. Cette discussion a été l'occasion d'affirmer des positions nouvelles très tranchées dont nous allons discuter¹, mais a aussi parfois mis à jour des incohérences et des confusions dans les concepts. On trouvera dans l'ouvrage de référence édité par Portney et Weyant (1999) les détails des termes du débat à la fin des années 1990. Je propose ici une synthèse de la littérature sur l'actualisation et l'environnement², centrée sur les apports les plus récents à cette question qui fait l'objet de recherches théoriques très

* Je remercie les participants aux Ateliers de l'Environnement du CORE du 6 novembre 2003 ainsi qu'un rapporteur anonyme pour leurs précieuses remarques. Je reste seule responsable des erreurs et omissions. E-mail : schubert@univ-paris1.fr

¹ Par exemple, il faudrait pour certains utiliser dans l'analyse coûts-bénéfices un taux d'actualisation nul pour les projets environnementaux et un taux positif pour les autres projets, tandis que, pour d'autres, il faudrait utiliser un taux d'actualisation décroissant au cours du temps.

² Ce travail actualise et approfondit Hirriart et Schubert (1998). Pearce *et al.* (2003) et Groom *et al.* (2005) présentent une tentative similaire.

actives et qui intéresse aussi vivement les praticiens du calcul économique public.

Le principe de base sur lequel repose l'actualisation est simple : « un euro tout de suite » est généralement préféré à « un euro dans le futur », car on peut toujours trouver un producteur prêt à investir cet euro pour en tirer à terme une valeur supérieure, et, symétriquement, un consommateur acceptant de renoncer à un euro de consommation immédiate en faveur d'une consommation future de plus grande valeur. Du point de vue du producteur, le concept qui traduit ce fait est le taux de rendement marginal du capital. Pour l'individu-consommateur, c'est le taux d'actualisation privé de la consommation qui traduit le prix du temps. Dans un monde de premier rang, l'efficacité intertemporelle de l'économie requiert que le taux de rendement marginal du capital soit à tout instant le même dans tous les secteurs et soit égal au taux d'intérêt du marché, et que le taux d'actualisation de la consommation leur soit aussi égal.

La discussion peut ensuite s'orienter dans deux directions, non exclusives : Que subsiste-t-il de l'unicité des taux quand l'économie n'est plus une économie de premier rang mais qu'y règnent différentes imperfections ? Que se passe-t-il quand on s'intéresse non plus aux décisions privées mais aux décisions publiques ?

Les économistes ont commencé à reconnaître dès les années soixante que dans une économie présentant des imperfections de marché, aucun taux d'actualisation unique ne peut être pris pour une mesure des trois grandeurs (taux de rendement du capital, taux d'intérêt de marché, taux d'actualisation privé de la consommation) simultanément. Par exemple, le taux d'intérêt n'est pas égal au taux de rendement privé du capital en raison de l'imperfection du marché des capitaux et de la fiscalité. Le taux d'actualisation approprié dépend alors du type d'imperfection qui prévaut sur les marchés et des distorsions qui causent une mauvaise allocation des ressources, ce qui rend malaisée une définition théorique générale.

En ce qui concerne le choix du taux d'escompte social, utilisé pour le calcul économique public, le clivage souligné par Arrow *et al.* (1996) entre approche *prescriptive* et approche *descriptive* est toujours présent. La première est normative, puisqu'elle est fondée sur une fonction de bien-être social exprimant un jugement quant à la façon dont l'utilité doit être distribuée au cours du temps, entre générations présentes et générations futures. La seconde, obéissant à des considérations d'efficacité intertemporelle et identifiant taux d'escompte et taux d'intérêt, est positive.

Quand on adopte l'approche prescriptive, il faut avant tout faire un choix de nature éthique, celui de la fonction de bien-être social. Une allocation intertemporelle optimale des ressources est une allocation pour laquelle cette fonction est maximale, et l'on peut montrer que les conditions nécessaires d'optimalité entraînent de nouveau l'unicité des taux, le taux d'escompte de la consommation étant maintenant le taux social, défini de manière appropriée en fonction du critère de bien-être social retenu. L'uni-

cité des taux entraîne, dans un monde de premier rang, la réconciliation des approches prescriptive et descriptive. Mais le monde n'est pas de premier rang, et les deux écoles de pensée sont dans la réalité difficilement réconciliables. En outre, il existe de multiples raisons qui peuvent faire diverger le taux d'escompte social et le taux privé. En effet, le premier doit refléter le choix collectif relatif à l'appréciation du futur, qui peut différer de l'appréciation privée. L'État peut adopter une attitude tutélaire s'il juge les agents privés trop myopes, ou pas assez altruistes envers les générations futures, ou plus généralement s'il juge qu'ils font de mauvais choix.

Le débat sur le choix du taux d'escompte social reste donc très ouvert. Pour aller plus loin, nous procédons selon le plan suivant.

La section 2 rappelle la définition théorique du taux d'escompte social de la consommation dans le cadre normatif du modèle utilitariste escompté, largement dominant, et montre que celui-ci n'est pas un « objet éthique premier », selon les termes de Dasgupta (2001), mais dépend du choix du numéraire, du taux de préférence pure pour le présent de la société, des caractéristiques de la fonction d'utilité et enfin des anticipations de croissance.

Nous avons vu que la pratique de l'actualisation est souvent présentée comme fâcheuse du point de vue des préoccupations relatives à l'environnement. On peut identifier dans la littérature trois approches pour résoudre ce problème. La première, présentée dans la section 3, consiste à remplacer le critère de bien-être social utilitariste escompté par un autre critère, en se fondant sur des considérations d'équité intergénérationnelle. La section 4 expose la deuxième, qui, sur un plan positif et non plus normatif, conteste l'idée d'un taux de préférence pure pour le présent constant et justifie par des considérations psychologiques sa décroissance au cours du temps. La troisième enfin (section 5) justifie par l'incertitude sur le futur l'utilisation d'un taux d'escompte de la consommation décroissant au court du temps et faible à long terme.

La section 6 conclut.

2 Critère utilitariste escompté et taux d'escompte social

Nous examinons tout d'abord la définition du taux d'escompte social selon l'approche prescriptive, et ses conséquences dans le cas dominant où la fonction de bien-être social est utilitariste escomptée.

Étant donnée la fonction de bien-être social intertemporel choisie par le planificateur, on détermine le sentier optimal le long duquel évolue l'économie, puis on décentralise ce sentier grâce à un système de prix approprié, les prix fictifs. Précisément, les prix fictifs sont définis comme la valeur d'un incrément de la variable correspondante à une date t en termes de sa contribution à la fonction objectif, le long d'un sentier optimal. On choisit ensuite

un numéraire. On appelle également le prix fictif du numéraire *facteur d'escompte social*. Dasgupta, Mäler et Barrett (1999) donnent alors la définition suivante : « À toute date, le taux d'escompte social est le taux auquel le prix fictif du numéraire diminue. Formellement, soit $R(t)$ la quantité de numéraire qui doit être disponible à l'instant t le long du sentier optimal. Sous les hypothèses d'un temps continu et d'un prix fictif différentiable, $-\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$ est le taux d'escompte social en t ».

Cette définition permet de calculer le taux d'escompte social implicite dans toute fonction de bien-être social intertemporel. Il dépend du numéraire choisi, ce qui nécessite d'être très précis dans les termes pour éviter les confusions. Nous parlerons ainsi respectivement de taux d'escompte social de l'utilité et de la consommation quand le numéraire est respectivement l'utilité et la consommation.

La pratique très majoritaire des économistes consiste à choisir un critère de bien-être social intertemporel *utilitariste escompté*, qui s'écrit $\int_0^{\infty} e^{-\rho t} u(t) dt$ où $u(t)$ est l'utilité instantanée en t . Cette formulation simple et élégante a été proposée par Paul Samuelson en 1937 pour représenter l'objectif intertemporel de l'agent représentatif. Les motifs psychologiques variés qui peuvent expliquer la préférence pour le présent des individus (voir Frederick, Loewenstein et O'Donoghue (2002)) y sont pour la première fois amalgamés en une variable unique, le *taux de préférence pure pour le présent* ρ . Les économistes ont adhéré immédiatement à cette formulation, et l'ont transposée en terme d'objectif social, de critère normatif, ce contre quoi Samuelson lui-même mettait en garde. Le succès de ce critère a encore grandi quand Koopmans (1960) a montré qu'il peut être dérivé d'un ensemble d'axiomes plausibles, les deux conditions les plus importantes sur la structure des préférences étant l'*indépendance* et la *stationnarité*. Dit autrement, un taux de préférence pure pour le présent positif et constant est nécessaire pour une représentation bien définie des préférences sur un horizon infini.

Prenons l'utilité comme numéraire. Alors, avec un critère de bien-être social utilitariste escompté, la contribution à la fonction objectif d'un incrément de l'utilité en t est simplement $R(t) = e^{-\rho t}$. Cette quantité est le facteur d'escompte de l'utilité, et le taux d'escompte correspondant, ρ , est le taux d'escompte de l'utilité, qui est ainsi, quand le critère de bien-être social est utilitariste escompté, confondu avec le taux de préférence pure pour le présent. Ce taux mesure l'impatience de la société. Il constitue un choix éthique : le planificateur qui choisit ce taux peut se contenter de refléter l'impatience des individus ou décider que l'impatience de la société se forme sur d'autres bases.

On ne choisit généralement pas l'utilité comme numéraire, mais plutôt la consommation agrégée. On définit alors le taux d'escompte de la consommation $\rho^C(t)$ comme le taux auquel le prix fictif de la consommation diminue, ce prix étant simplement la valeur présente de l'utilité marginale de la consommation en t .

Si l'utilité ne dépend que de la consommation i.e. $u(t) = u(C(t))$, on a ainsi $R^C(t) = e^{-\rho t} u'(C(t))$ et donc :

$$\rho^C(t) = -\frac{1}{R^C(t)} \frac{dR^C(t)}{dt} = \rho + \eta(C(t)) \frac{\dot{C}(t)}{C(t)} \quad (1)$$

où $\eta(C) = -\frac{Cu''(C)}{u'(C)}$ est l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation (l'inverse de l'élasticité de substitution intertemporelle) et représente l'aversion de la société aux fluctuations de la consommation.

Dans le cas plus général où l'utilité dépend de la consommation et d'un capital naturel $S(t)$ (stock de ressources naturelles, qualité de l'environnement, stock d'aménités environnementales...) on a $R^C(t) = e^{-\rho t} u_C(C(t), S(t))$ et donc :

$$\rho^C(t) = -\frac{1}{R^C(t)} \frac{dR^C(t)}{dt} = \rho + \eta_{CC} \frac{\dot{C}(t)}{C(t)} + \eta_{CS} \frac{\dot{S}(t)}{S(t)} \quad (2)$$

où $\eta_{CC} = -Cu_{CC}/u_C$ et $\eta_{CS} = -Su_{CS}/u_C$ sont les élasticités de l'utilité marginale de la consommation. Le taux d'escompte de la consommation dépend ainsi du taux de préférence pure pour le présent et des taux de croissance de la consommation et du capital naturel. Comme l'élasticité η_{CC} est positive, un taux de croissance de la consommation positif entraîne toutes choses égales par ailleurs $\rho^C(t) > \rho$. C'est l'*effet de richesse*. À côté de cet effet apparaît l'influence du taux de croissance du capital naturel. Cette influence dépend du signe de η_{CS} , c'est-à-dire de l'opposé du signe de u_{CS} , qui caractérise lui-même la complémentarité ou la substituabilité de la consommation et du capital naturel dans le bien-être. Selon la terminologie de Michel et Rotillon (1996), si la fonction d'utilité traduit un *effet de compensation* ($u_{CS} < 0$) c'est-à-dire si une diminution du capital naturel entraîne une augmentation de l'utilité marginale de la consommation qui pousse les individus à consommer davantage, une diminution du capital naturel entraîne toutes choses égales par ailleurs $\rho^C(t) < \rho$. C'est l'inverse en cas d'*effet de dégoût*.

Pour l'analyse coûts-bénéfices, le taux d'escompte de la consommation n'est pas suffisant. Il faut également décrire l'évolution du système des prix relatifs, qui se réduit ici au prix du capital naturel relativement au prix de la consommation. Ce prix relatif est le rapport de la valeur d'un incrément du capital naturel à une date t en termes de sa contribution à la fonction objectif à la valeur d'un incrément de consommation en termes de sa contribution à la fonction objectif. Pour la consommation, cette valeur est simplement $e^{-\rho t} u_C(C(t), S(t))$, et pour l'environnement $e^{-\rho t} u_S(C(t), S(t))$. Le prix relatif est donc $p(t) = \frac{u_S(C(t), S(t))}{u_C(C(t), S(t))}$. Les faits stylisés montrent qu'à de faibles niveaux de revenu les préoccupations environnementales représentent une priorité relativement faible. Mais elles prennent de l'importance lorsque le revenu s'élève. Il existe diverses raisons à cela, la plus courante étant que les

aménités environnementales sont un bien de luxe avec une élasticité-revenu élevée. Il semble donc que lorsque l'économie se développe, les « termes de l'échange » basculent en faveur de l'environnement, ce qui se traduit par $\frac{\dot{p}(t)}{p(t)} > 0$.

Si on choisit non plus la consommation mais le capital naturel comme numéraire, on peut de la même façon définir le taux d'escompte social de l'environnement, et on voit aisément que :

$$\rho^S(t) = -\frac{1}{R^S(t)} \frac{dR^S(t)}{dt} = \rho + \eta_{SC} \frac{\dot{C}(t)}{C(t)} + \eta_{SS} \frac{\dot{S}(t)}{S(t)} = \rho^C(t) - \frac{\dot{p}(t)}{p(t)} \quad (3)$$

où $\eta_{SC} = -C u_{CS} / u_S$ et $\eta_{SS} = -S u_{SS} / u_S$ sont les élasticités de l'utilité marginale du capital naturel.

Donc dans un modèle d'équilibre général bien spécifié on obtient de façon endogène, sans avoir besoin de recourir à des hypothèses particulières, des taux d'escompte de la consommation – si celle-ci est choisie comme numéraire – et de l'environnement – si c'est celui-là – différents et variables au cours du temps en fonction des évolutions de la consommation et du capital naturel. Le second est plus faible que le premier dès lors que les préoccupations environnementales augmentent au cours du temps (équation (3)). Notons que ceci ne justifie absolument pas de recourir dans l'analyse coûts-bénéfices à deux taux différents, l'un pour les projets indépendants des questions environnementales et l'autre pour les projets à fort contenu environnemental, comme il a pu être proposé par certains auteurs (Yang (2003) par exemple).

En dépit de l'évidente portée pratique des considérations qui précèdent pour l'analyse coûts-bénéfices, d'importantes difficultés de mesure subsistent. Il n'existe aucun consensus sur la réalité empirique de l'effet de dégoût ou de l'effet de compensation, c'est-à-dire sur la complémentarité ou la substituabilité de la consommation et de l'environnement dans les préférences. Même si l'on suppose par défaut que la fonction d'utilité est séparable en la consommation et l'environnement, il faut encore choisir, pour obtenir une valeur du taux d'escompte de la consommation donné par l'équation (1), la valeur du taux de préférence pure pour le présent, faire une hypothèse sur celle de l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation et enfin disposer d'une prévision sur la croissance future de la consommation.

3 La remise en cause du critère utilitariste escompté

L'approche précédente soulève de nombreuses critiques qui conduisent à remettre en cause le critère de bien-être social sous-jacent, et proposer des critères alternatifs, toujours dans un cadre normatif. Je présente successivement le critère utilitariste non escompté dans lequel le taux de préférence

pure pour le présent est nul, le critère de Chichilnisky qui est une somme pondérée du critère utilitariste escompté et d'un critère prenant en compte la valeur à l'infini de l'utilité, un critère proposé par Li et Löfgren qui tente également de concilier présent et futur, et enfin un critère utilitariste escompté dans lequel le taux d'escompte est endogène.

3.1 Un taux de préférence pure pour le présent nul

Ramsey (1928) écrivait : "It is assumed that we do not discount later enjoyments in comparison with earlier ones, a practice which is ethically indefensible and arises merely from the weakness of the imagination", rejetant ainsi d'emblée l'utilisation d'un taux de préférence pure pour le présent positif sur des bases éthiques. La position de Harrod (1948) était la même : "On the assumption ... that a government is capable of planning what is best for its subjects, it will pay no attention to pure time preference, a polite expression for rapacity and the conquest of reason by passion".

L'emploi d'un taux de préférence pure pour le présent positif indique évidemment l'introduction d'une asymétrie entre les générations dans le sens d'une préférence pour les générations présentes et proches. Cependant, cette pratique doit être jugée, comme le soulignait Koopmans (1965), non pas en soi mais au regard des conséquences qu'elle entraîne sur l'évolution optimale de l'économie. Dasgupta et Heal (1979) partagent ce point de vue : "It is injudicious to comment on a moral doctrine without having, as a first step, undertaken an analysis of its implications under various plausible assumptions".

Koopmans (1960) indique qu'employer un taux de préférence pour le présent nul n'est qu'en apparence garant d'un traitement équitable de toutes les générations : ceci entraîne, pour un calibrage des paramètres plausibles dans un modèle de croissance optimale simple, des taux d'épargne optimaux extrêmement élevés, irréalistes, pour les générations présentes et proches, c'est-à-dire en fait un sacrifice du présent au profit du futur. La raison en est que les générations futures sont en nombre infini. Utiliser un critère de bien-être social utilitariste non escompté (c'est-à-dire avec un taux de préférence pure pour le présent nul) ne constitue donc pas un remède aux défauts de l'actualisation.

Notons enfin qu'il faut distinguer la position de Ramsey et Harrod, qui porte sur le taux de préférence pure pour le présent, de la tentation d'utiliser un taux d'escompte nul, qui reste très forte quand il s'agit de choix environnementaux. Cette tentation me semble reposer sur une confusion entre taux de préférence pure pour le présent et taux d'escompte social de la consommation, qui ne sont égaux que dans une économie stationnaire, et ne me semble en rien justifiée.

3.2 Critère de Chichilnisky et équité intergénérationnelle

Chichilnisky (1996) reproche précisément au critère utilitariste escompté d'entraîner une *dictature du présent*, au sens où ce qui se produit dans l'économie après une certaine date suffisamment lointaine ne joue aucun rôle dans le choix présent entre différents flux d'utilité. Elle propose alors un ensemble d'axiomes de choix social intergénérationnel complexes, qu'on peut résumer en disant que ni le présent ni le futur ne doivent être dictatoriaux, au sens précédent. La fonction objectif correspondante peut s'écrire (voir Heal (1993)) comme une somme pondérée du critère utilitariste escompté (qui prend soin des intérêts du présent) et d'un critère dépendant du comportement à la limite de l'utilité (qui prend soin des intérêts du futur) :

$$\theta \int_0^{\infty} a(t)u(C(t), S(t))dt + (1 - \theta) \liminf_{t \rightarrow \infty} u(C(t), S(t)) \quad 0 < \theta < 1 \quad (4)$$

où $a(t)$ est un facteur d'escompte satisfaisant $\int_0^{\infty} a(t)dt = 1$, par exemple (mais pas nécessairement) le facteur d'escompte exponentiel habituel $e^{-\rho t}$.

Cette axiomatique est séduisante puisqu'elle rétablit la symétrie entre les générations, sans que s'applique la critique que fait Koopmans de l'utilisation d'un taux de préférence pour le présent nul, qui induit un sacrifice des générations présentes. Elle a été appliquée à plusieurs problèmes de croissance optimale avec ressources naturelles (voir Heal (1998)). Comme alternative générale à l'utilisation du critère utilitariste escompté dans les modèles d'allocation intertemporelle des ressources, elle présente cependant plusieurs inconvénients.

Tout d'abord, l'utilisation du critère de Chichilnisky oblige le planificateur à un nouveau choix, celui du poids accordé au présent par rapport au futur (paramètre θ), reportant ainsi en quelque sorte le problème. Notons toutefois qu'ici le choix entre présent et futur est explicite, alors qu'il est implicite dans la pratique courante. Ensuite, certains problèmes simples comme celui de l'utilisation optimale au cours du temps d'une ressource renouvelable n'ont pas de solution avec ce critère si le taux d'escompte de l'utilité correspondant au facteur $a(t)$ est constant, comme le montre Heal (1998); il y a en effet dans ce cas conflit entre présent et futur, que seul le choix d'un taux d'escompte de l'utilité tendant à long terme vers zéro permet de résoudre. En outre, le critère de Chichilnisky n'est (pour l'instant ?) pas d'utilisation simple pour les économistes, qui ne disposent pas d'un outil général et puissant comme le contrôle optimal pour déterminer les sentiers optimaux au regard de ce critère. Enfin, Dasgupta (2001) critique cette axiomatique sur le plan conceptuel : quand on sait que la durée d'existence du monde est finie, il semble paradoxal d'utiliser un critère donnant un poids important au bien-être à l'infini, comme le fait la partie asymptotique du critère de Chichilnisky.

3.3 La coexistence du présent et du futur

Li et Löfgren (2000) considèrent une économie à deux individus représentatifs, un « utilitariste », au taux de préférence pure pour le présent θ positif, et un « conservationniste », au taux de préférence pure pour le présent δ tendant vers zéro. Il est connu que dans une économie à agents hétérogènes en matière d'impatience ce sont les choix du plus patient qui l'emportent à long terme (voir par exemple Blanchard et Fischer (1989)). L'apport de Li et Löfgren réside davantage dans l'interprétation qu'ils font de leurs deux individus : le premier représente le présent et le second le futur. Ainsi, par rapport à l'approche de Chichilnisky, présent et futur ne sont pas opposés mais coexistent à chaque instant, le poids du futur, faible au début, augmentant au cours du temps.

Les deux individus ont la même fonction d'utilité $u(C, S)$. La fonction de bien-être social est une somme pondérée des utilités intertemporelles des deux individus et s'écrit :

$$\alpha \int_0^{\infty} e^{-\theta t} u(C(t), S(t)) dt + (1 - \alpha) \int_0^{\infty} e^{-\delta t} u(C(t), S(t)) dt = \int_0^{\infty} a(t) u(C(t), S(t)) dt \quad (5)$$

où α est le poids accordé par le planificateur au bien-être intertemporel du conservationniste, et $a(t)$ le facteur d'escompte résultant de cette spécification, qui vaut :

$$a(t) = \alpha e^{-\theta t} + (1 - \alpha) e^{-\delta t} \quad (6)$$

Le taux d'escompte de l'utilité associé est alors :

$$\rho(t) = -\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} = \frac{\alpha \theta e^{(\delta - \theta)t} + (1 - \alpha) \delta}{\alpha e^{(\delta - \theta)t} + (1 - \alpha)} \quad (7)$$

Comme par hypothèse $\theta > \delta$, on a

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = \delta \quad (8)$$

ce qui signifie que le taux de préférence pure pour le présent de long terme de cette économie est celui de l'agent conservationniste et donc tend vers zéro. En revanche, à court terme,

$$\rho(0) = \alpha \theta + (1 - \alpha) \delta \quad (9)$$

et le taux de préférence pure pour le présent est une moyenne pondérée des deux taux, tendant vers $\alpha \theta$. On montre sans difficulté que $\rho(t)$ décroît au cours du temps, de $\alpha \theta$ à 0.

Les auteurs montrent que le sentier optimal obtenu avec ce critère se situe « entre » le sentier utilitariste et le sentier conservacionniste et converge à long terme vers ce dernier.

On a $\int_0^{\infty} a(t)dt = \frac{\alpha}{\delta} + \frac{1-\alpha}{\delta}$ qui devient infini quand δ tend vers 0. La somme des facteurs d'escompte ne converge pas, ce qui nécessite un traitement mathématique particulier du problème de croissance optimale³. Les auteurs soulignent que c'est cette propriété de non convergence qui assure l'absence de dictature du présent.

Une limite de cette approche me semble résider dans le caractère un peu factice de l'interprétation des deux individus en termes de présent et futur, qui est simplement une façon de justifier l'adoption d'un critère utilitariste escompté avec un taux de préférence pour le présent décroissant. L'autre limite est partagée avec le critère de Chichilnisky : le planificateur doit choisir les poids accordés à l'individu utilitariste et à l'individu conservacionniste.

3.4 Un taux de préférence pour le présent endogène

Ayong le Kama et Schubert (2002) présentent un modèle de croissance endogène optimale dans lequel la consommation découle directement de l'utilisation des services de l'environnement et dégrade la qualité de celui-ci. Cette qualité de l'environnement est facteur de bien-être au côté de la consommation. En outre, le planificateur, motivé par des considérations d'équité intergénérationnelle, fait le choix éthique d'un taux d'escompte de l'utilité dépendant de la qualité de l'environnement, de façon croissante : plus cette dernière est faible plus ce taux est faible, entre certaines bornes exogènes⁴. Une société de ce type dans laquelle l'environnement est dégradé décide ainsi d'être moins impatiente et d'accorder au futur un poids plus grand.

Quand l'escompte est exogène et exponentiel, la solution générale du modèle est une croissance ou une décroissance à taux constant de la consommation et de la qualité de l'environnement conjointement. La convergence de l'économie vers un état stationnaire apparaît seulement pour une configuration très particulière des paramètres. En revanche, quand l'escompte est endogène, la convergence vers un état stationnaire apparaît de façon générique, pourvu que le taux d'escompte soit autorisé à varier entre des

³ La valeur présente totale des flux d'utilité est infinie; l'utilisation du critère du catching-up, qui consiste à examiner la différence entre deux flux d'utilité et non pas à comparer leur niveau, permet cependant de trouver la solution optimale.

⁴ Pittel (2002) a un projet similaire, dans un modèle de croissance plus complexe, mais fait dépendre le taux d'escompte de façon décroissante de la qualité de l'environnement, avec l'argument selon lequel « plus l'environnement est intact plus les ménages sont désireux de retarder leur consommation et d'investir dans leur propre futur ou le bien-être de leurs descendants ». Cette hypothèse est l'exact opposé de celle de Ayong le Kama et Schubert (2002). Pittel la justifie par des considérations positives portant sur les préférences des agents, qui me semblent du même ordre que les discussions sur la question de savoir si environnement et consommation sont complémentaires ou substituables (signe de u_{CS}). L'approche de Ayong le Kama et Schubert (2002) est au contraire normative.

bornes suffisamment larges. Ainsi, l'escompte endogène prévient dans une certaine mesure l'apparition de sentiers de croissance optimaux le long desquels la qualité de l'environnement est totalement dégradée à long terme. Fall et Schubert (2005) obtiennent le même type de résultat dans un modèle avec accumulation de capital et émissions de pollution : choisir un taux d'escompte de l'utilité variable en fonction de l'état de l'environnement avec une impatience d'autant plus faible que la pollution est élevée permet d'obtenir des sentiers optimaux de croissance plus respectueux de l'environnement.

4 Un taux de préférence pure pour le présent décroissant

Nous quittons maintenant l'approche normative pour un point de vue positif. De nombreuses observations du comportement individuel et de multiples expériences (rapportées par exemple par Ainslie (1992) et Frederick, Loewenstein et O'Donoghue (2002)) mettent en évidence plusieurs effets qui contredisent le modèle d'espérance d'utilité. L'un de ces effets est l'*effet de différence commune* (Loewenstein et Prelec (1992)), selon lequel les individus (et les animaux) seraient plus sensibles à un délai temporel donné s'il advient plus tôt que plus tard. Ainsi, un individu pourrait préférer une pomme aujourd'hui à deux pommes demain, mais en même temps préférer deux pommes dans 51 jours à une pomme dans 50 jours (Thaler (1991)). Cet effet est en contradiction avec la propriété de stationarité, qui joue un rôle central dans la dérivation axiomatique du critère utilitariste escompté. Loewenstein et Prelec (1992) montrent que les fonctions d'escompte permettant de reproduire cet effet sont approximativement hyperboliques. Heal (1998) rapporte également des expériences donnant à penser que les individus n'actualisent pas à un taux constant. Faisant l'analogie avec une loi des sciences naturelles, la *loi de Weber-Fechner*, qui indique que la réponse humaine à un changement de stimulus est inversement proportionnelle au niveau initial du stimulus, Heal remarque que le report d'un coût ou d'un bénéfice de l'année prochaine à l'année suivante est très différemment apprécié du même report de cinquante ans plus tard à cinquante et un ans. Dans les deux cas, le report est d'un an dans l'absolu, mais le temps d'attente double dans un cas alors qu'il n'augmente que de 2% dans l'autre. Or nous réagirions à des accroissements proportionnels plutôt qu'absolus du temps. D'où la proposition de retenir un taux de préférence pour le présent décroissant au cours du temps. Par rapport à la pratique traditionnelle, ceci permet d'accorder un poids supérieur au futur, d'autant plus qu'il est lointain.

Le tableau suivant rapporte différentes propositions d'actualisation décroissante, en temps continu. Le facteur d'escompte est $a(t)$, et le taux d'escompte de l'utilité correspondant est $\rho(t) = -\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$.

	$a(t)$	$\rho(t)$	
Harvey (1994)	$\frac{b}{b+t}$	$\frac{1}{b+t}$	$b > 0$
Heal (1998) (<i>escompte logarithmique</i>)	$e^{-c \ln t}$	$\frac{c}{t}$	$c > 0, t > 0$
Loewenstein et Prelec (1992) (<i>escompte hyperbolique</i>)	$(1 + \alpha t)^{-\frac{\rho}{\alpha}}$	$\frac{\rho}{1 + \alpha t}$	$\alpha, \rho > 0$
Barro (1999)	$e^{-\rho t + \frac{b}{\gamma} e^{-\gamma t}}$	$\rho + b e^{-\gamma t}$	$\gamma > 0, b \geq 0$

Laibson (1997) propose une *fonction d'escompte quasi-hyperbolique*, ou escompte dit $\beta\delta$, en temps discret :

$$\begin{cases} a(t) = \beta\delta^t, & \beta < 1, \quad \forall t \geq 1 \\ a(0) = 1 \end{cases}$$

Le taux d'escompte associé est :

$$\begin{cases} \rho(t) = -\frac{a(t) - a(t-1)}{a(t)} = \frac{1}{\delta} - 1 \quad \forall t > 1 \\ \rho(1) = -\frac{a(1) - a(0)}{a(1)} = \frac{1}{\beta\delta} - 1 \end{cases}$$

Ce taux est le même pour toutes les périodes sauf la première. On a $\rho(1) > \rho(t) \forall t > 1$ dès lors que $\beta < 1$.

Cependant, les choix effectués avec actualisation décroissante sont frappés d'*incohérence temporelle*. Le décideur est en effet incité à remettre en cause aux périodes ultérieures ses décisions de la période courante, car le taux d'actualisation qu'il applique aux résultats successifs change au cours du temps. La littérature sur ce sujet souligne que cette incitation n'a pas de conséquences si le décideur peut se lier les mains à la période courante en prenant l'engagement de ne pas dévier de ses choix, et s'interroge sur les institutions qui permettent d'assurer la crédibilité d'un tel engagement. En l'absence de possibilités d'engagement crédible, elle modélise cette situation comme un jeu entre les différentes incarnations temporelles successives du décideur, chacune effectuant ses choix en prenant ceux de l'incarnation qui lui succède comme donnés. Laibson (1996) montre qu'un agent ayant des préférences quasi-hyperboliques et jouant le jeu intra-personnel précédent prend des décisions qui ressemblent exactement à celles qu'il aurait prises s'il avait escompté de manière exponentielle. C'est l'*équivalence observationnelle*. De même, Barro (1999) montre dans un modèle de croissance

à la Ramsey avec actualisation décroissante que la solution du jeu intrapersonnel du planificateur est finalement un sentier de croissance identique à celui qu'aurait choisi un planificateur actualisant à taux constant. Ceci relativise la portée de l'argument d'incohérence temporelle : il n'est pas pertinent s'il existe des possibilités crédibles de se lier les mains, et si ce n'est pas le cas, on peut exhiber des cas dans lesquels tout se passe comme si le décideur actualisait à taux constant.

Il existe d'importantes présomptions empiriques en faveur de la thèse selon laquelle le taux de préférence pure pour le présent des individus est décroissant au cours du temps. Faut-il alors aller jusqu'à recommander que, l'impatience de la société reflétant celle des individus, le planificateur soit incohérent intertemporellement ? La majorité des économistes semble répondre non. Mais Heal (1998) par exemple argumente que l'incohérence temporelle n'est pas un problème mais plutôt une réalité, décrivant le comportement observable des décideurs. La question reste à mon sens ouverte.

5 Incertitude et taux d'escompte

Les approches précédentes se placent toutes dans un cadre déterministe. Or l'avenir n'est pas certain, et l'incertitude est probablement d'autant plus grande que l'on considère des horizons longs. L'incertitude porte sur toutes les variables pertinentes pour le calcul économique public, et surtout, dans le cadre très agrégé que nous retenons ici, sur le taux de croissance de l'économie et sur les taux d'intérêt.

5.1 Incertitude sur le taux de croissance futur de la consommation

Comment reformuler (1) pour déterminer un taux d'escompte de la consommation utilisable dans l'analyse coûts-bénéfices quand on ne connaît pas le taux de croissance futur de la consommation, et que l'incertitude sur ce taux de croissance est d'autant plus grande que l'on s'intéresse à un terme plus lointain ? C'est à cette question que répond Gollier (2002a), (2002b).

Gollier (2002a) se place dans une situation d'équilibre partiel où les exogènes fondamentaux sont les taux de croissance futurs de la consommation, aléatoires. Il cherche dans ce cadre à déterminer les taux d'escompte social de la consommation que l'agent doit utiliser aujourd'hui pour actualiser ses consommations futures. Plus précisément, Gollier considère une économie à un seul bien (pas de capital naturel) à taux de croissance exogène aléatoire \tilde{g} dans laquelle un consommateur représentatif maximise la somme de ses utilités futures anticipées escomptées au taux ρ constant. Le temps est discret. C est la consommation initiale de l'agent et $\tilde{C}(t) = C \prod_{\tau=0}^t (1 + \tilde{g}(\tau))$

sa consommation en t (aléatoire). Gollier définit le *taux d'escompte socialement efficace* correspondant à une maturité t , $r(t)$, comme le taux de rendement qui laisse l'utilité anticipée escomptée de l'agent inchangée :

$$(1 + r(t))^t = \frac{u'(C)}{\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^t Eu' \left(C \prod_{\tau=0}^t (1 + \tilde{g}(\tau)) \right)} \tag{10}$$

Gollier (2002b) s'intéresse au court terme. Pour $t = 1$, l'équation suivante s'écrit, avec une adaptation des notations évidente :

$$1 + r(1) = \frac{u'(C)}{\frac{1}{1+\rho} Eu' (C(1 + \tilde{g}))} \tag{11}$$

Si l'utilité marginale est convexe, on a $Eu' (C(1 + \tilde{g})) \geq u' (E(C(1 + \tilde{g})))$ et donc $r(1)$ est inférieur ou égal au taux de rendement qui prévaudrait dans un monde certain où la consommation courante serait C et la consommation de la période suivante $CE(1 + \tilde{g})$. Dans le cas d'une utilité marginale convexe donc, une incertitude sur le taux de croissance de l'économie réduit le taux d'escompte social de court terme par rapport au cas où ce taux est certain. Plus précisément, on a :

$$r(1) \simeq \rho + \eta(C)E(\tilde{g}) - \frac{\eta(C_t)}{2} var(\tilde{g})P(C) \tag{12}$$

où $P(C)$ est l'indice de prudence relative, défini par $P(C) = -\frac{Cu'''(C)}{u''(C)}$ avec $u'''(C) > 0$ si l'agent est prudent. Par rapport à l'équation (1), le terme supplémentaire à droite de cette équation représente l'*effet de précaution*. Cet effet joue en sens inverse de l'effet de richesse dès lors que l'agent est prudent.

Gollier (2002a), (2002b) s'intéresse également au long terme. Il montre que dans le cas où l'économie ne connaît pas de risque de récession ($\tilde{g} > 0$ presque sûrement), $r(t)$ décroît avec t si et seulement si l'aversion relative de l'agent pour le risque $\eta(C)$ est décroissante. Le cas où il y a risque de récession est plus complexe. Gollier (2002b) montre qu'il faut ajouter des conditions complexes et peu intuitives sur les dérivées quatrième et cinquième de la fonction d'utilité pour obtenir une décroissance de $r(t)$ avec t .

Enfin, Gollier (2002a) cherche à déterminer le taux d'escompte de la consommation de très long terme d'une économie qui ne connaît pas de risque de récession. Il suppose que $\eta_\infty = \lim_{C \rightarrow \infty} \eta(C)$ existe et montre alors que ce taux d'escompte, $r_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} r(t)$ existe et est défini par :

$$1 + r_\infty = \frac{1}{\frac{1}{1+\rho} E(1 + \tilde{g})^{-\eta_\infty}} \tag{13}$$

c'est-à-dire que le taux d'escompte de la consommation de très long terme est égal au taux d'escompte de court terme d'une économie dans laquelle les agents ont une aversion relative pour le risque constante η_∞ .

5.2 Incertitude sur les taux d'intérêt futurs

On revient ici à une approche descriptive.

Weitzman (1998) se place également dans un cadre d'équilibre partiel, mais l'exogène fondamental est pour lui le taux d'intérêt sans risque de court terme r , qui est supposé rester constant au cours du temps, qui est inconnu aujourd'hui mais dont la valeur va être révélée très rapidement. Je présente le résultat de Weitzman en suivant l'explication qu'en fait Gollier (2002a).

Soit $r(t)$ le taux d'escompte socialement efficace correspondant à la maturité t , calculé par l'agent représentatif avant que \tilde{r} ne soit révélé. On suppose que l'agent est neutre au risque. Il désire obtenir un bénéfice certain de 1\$ en T . S'il attend un instant que \tilde{r} soit révélé, il placera $\frac{1}{(1+r)^T}$ pour obtenir de façon certaine ce bénéfice. S'il n'attend pas, il peut décider d'investir dans un bond de maturité T dont le taux est $r(T)$ par définition. Il faudra alors qu'il investisse un montant $\frac{1}{(1+r(T))^T}$. Comme l'agent est neutre au risque, une possibilité d'arbitrage apparaît si l'on n'a pas $\frac{1}{(1+r(T))^T} = E\frac{1}{(1+\tilde{r})^T}$ c'est-à-dire

$$1 + r(T) = (E(1 + \tilde{r})^{-T})^{-\frac{1}{T}} \quad (14)$$

$r(T)$ est ainsi la moyenne harmonique de \tilde{r} et est donc inférieur à sa moyenne arithmétique $E\tilde{r}$. Weitzman montre qu'il tend, quand T devient très grand, vers la valeur la plus faible que puisse prendre \tilde{r} , notée r_{\min} , et en déduit qu'il faut appliquer le taux d'escompte le plus faible possible aux composantes de tout projet d'investissement mettant en jeu le futur très lointain. L'intuition de ce résultat tient dans le fait que la bonne façon de faire est de prendre l'espérance sur tous les états du monde non pas des taux d'escompte mais des facteurs d'escompte, et qu'à la limite l'équivalent-certain des facteurs d'escompte correspond au taux d'escompte minimum, parce que le passage du temps a rendu tous les autres taux d'escompte insignifiants par rapport au taux minimum.

Newell et Pizer (2003) soulignent que le résultat de Weitzman est fondé sur le fait que le taux d'escompte est non seulement incertain mais aussi persistant, extrêmement corrélé au cours du temps (chez Weitzman, le vrai taux d'escompte, une fois l'incertitude levée, sera le même à toutes les périodes, forme extrême de persistance). Intuitivement on sent bien qu'une incertitude sans persistance aura peu d'effet : tout taux élevé à une période pourra être compensé par un taux faible à une autre.

Weitzman (2001) se propose de quantifier l'incertitude sur le taux d'escompte de la consommation grâce à une enquête par courrier électro-

nique auprès de 2800 économistes professionnels (2160 réponses). La question posée est la suivante : “Taking all relevant considerations into account, what real interest rate do you think should be used to discount over time the (expected) benefits and (expected) costs of projects being proposed to mitigate the possible effects of global climate change?”. Chaque économiste fournit une réponse unique x , et l’auteur fait l’hypothèse qu’elle correspond au taux d’escompte personnel, constant, de cet économiste. Cette méthode permet d’évaluer l’incertitude ou plutôt le manque de consensus présent sur le taux d’escompte correct à utiliser pour le très long terme. Le résultat est que les réponses $[x]$ sont distribuées comme les réalisations d’une variable aléatoire dont la fonction de densité de probabilité $f(x)$ est une fonction gamma. L’auteur estime les paramètres α et β de cette fonction à partir des réponses. Il calcule ensuite le facteur d’escompte pour la date t par $A(t) = \int_0^{\infty} e^{-xt} f(x) dx$, et le taux d’escompte correspondant par $R(t) = -\frac{\dot{A}(t)}{A(t)}$ et montre que l’on obtient $R(t) = \frac{1}{\beta+t}$, soit un taux d’escompte décroissant au cours du temps.

Cette approche déduit l’évolution temporelle du taux d’escompte de la dispersion inter-individuelle des réponses à une question portant sur le taux d’escompte approprié pour le très long terme. En dépit des explications de l’auteur, cette déduction ne me semble pas aller de soi.

Newell et Pizer (2003) adoptent une approche différente. Ils supposent qu’il existe un relatif consensus présent sur le taux d’escompte de la consommation à utiliser, fondé sur les taux de marché observés, mais que ce taux est susceptible de changer dans le futur. Les données historiques de taux d’intérêt sur 2 siècles aux États-Unis montrent que ces taux sont en effet incertains et persistants. Ils utilisent ces données pour calculer le « taux d’équivalent certain » (c’est-à-dire non pas l’équivalent certain des taux mais le taux résultant de l’équivalent certain des facteurs d’escompte) qui résume les effets de l’incertitude, sous deux hypothèses, celle d’une marche aléatoire et celle d’un processus de retour à la moyenne. Ils montrent que dans les deux cas les taux futurs sont significativement plus faibles que le taux présent : sous l’hypothèse de marche aléatoire, ils passent de 4% à 2% après 100 ans, 1% après 200 ans et 0,5% après 300 ans.

L’ensemble de ces travaux plaide donc pour l’utilisation dans l’analyse coûts-bénéfices de taux d’escompte de la consommation décroissants au cours du temps, pour des raisons différentes quoique toutes liées à l’incertitude.

6 Conclusion

Ce survol de la littérature met en lumière la grande difficulté qu’il existe à déterminer la « bonne » procédure concernant le choix d’un taux d’actualisation social de la consommation. Un argument en faveur de l’approche

prescriptive est l'impossibilité de disposer de taux d'intérêt à échéances très lointaines. Mais il ne faut pas se contenter d'appliquer l'équation (1) : les arguments de Gollier et Weitzman sur la nécessité de tenir compte de l'incertitude qui entâche le futur sont à mon sens très convaincants, et poussent à plaider pour un taux d'escompte de la consommation décroissant au cours du temps.

Le choix du taux d'actualisation pour la sélection des projets publics a une très grande portée empirique. Bien que tous les pays, tant s'en faut, n'aient pas choisi un taux d'actualisation décroissant, le Royaume-Uni (Green Book, HM Treasury (2003)) et la France (rapport du groupe Lebègue, Commissariat Général au Plan (2005)) recommandent depuis peu cette solution. La proposition du groupe Lebègue est la suivante : retenir un taux de 4% par an, décroissant à partir de 30 ans et atteignant environ 2% au bout de 500 ans. Le Green Book quant à lui impose un taux de 3,5% par an, décroissant à partir de 30 ans en passant par paliers de 3,5% à 1% au-delà de 300 ans. Dans les deux cas, les arguments justifiant de ne faire décroître le taux qu'après 30 ans sont d'une part que c'est à cet horizon que l'incertitude sur la croissance devient très significative, et d'autre part qu'il n'existe plus après 30 ans d'actif financier sans risque. Les chiffres précisément retenus restent cependant arbitraires, davantage fondés sur les impressions et les analyses des experts que sur un modèle théorique. Les difficultés d'ordre pratique restent donc importantes.

Rappelons pour finir que le calcul économique public ne peut se contenter du taux d'actualisation mais doit disposer, pour traiter correctement des projets ayant des conséquences environnementales, des prix relatifs des actifs naturels par rapport aux biens de consommation.

References

- Ainslie, G. (1992), *Picoeconomics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Arrow, K., W. Cline, K.-G. Mäler, M. Munasinghe, R. Squitieri et J. Stiglitz (1996), "Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency", in *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, éd. par J. Bruce, H. Lee et E. Haites, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ayong Le Kama, A. et K. Schubert (2002), "The Consequences of an Endogenous Discounting Depending on Environmental Quality", Working paper, EUREQua, Université de Paris 1.
- Barro, R. (1999), "Ramsey Meets Laibson in the Neoclassical Growth Model", *Quarterly Journal of Economics*, 114, pp. 1125-1152.
- Blanchard, O. et S. Fischer (1989), *Lectures on Macroeconomics*, MIT Press.
- Chichilnisky, G. (1996), "An Axiomatic Approach to Sustainable Development", *Social Choice and Welfare*, 13, pp. 231-257.

- Commissariat Général du Plan (2005), *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, Rapport du groupe d'experts présidé par D. Lebègue.
- Dasgupta, P. (2001), *Human Well-Being and the Natural Environment*, Oxford University Press.
- Dasgupta, P. et G. Heal (1979), *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press.
- Dasgupta, P., K. Maler et S. Barrett (1999), "Intergenerational Equity, Social Discount Rates and Global Warming", in *Discounting and Intergenerational Equity*, éd. par P. Portney et J. Weyant, chap. 7, Resources for the Future, Washington DC.
- Fall, E. H. et K. Schubert (2005), "Endogenous Discounting, Growth and Pollution", Working paper, EUREQua, Université de Paris 1.
- Frederick, S., G. Loewenstein et T. O'Donoghue (2002), "Time Discounting and Time Preference: A Critical Review", *Journal of Economic Literature*, 40, pp. 351–401.
- Gollier, C. (2002a), "Time Horizon and the Discount Rate", *Journal of Economic Theory*, 107, pp. 463–473.
- Gollier, C. (2002b), "Discounting an Uncertain Future", *Journal of Public Economics*, 85, pp. 149–166.
- Groom, B., C. Hepburn, P. Koundouri et D. Pearce (2005), "Discounting the Future: The Long and the Short of it", *Environmental and Resource Economics*.
- Harrod, R. (1948), *Towards a Dynamic Economy*, Macmillan Press, London.
- Harvey, C. (1994), "The Reasonableness of Non-Constant Discounting", *Journal of Public Economics*, 53, pp. 31–51.
- Heal, G. (1993), "Valuing the Very Long Run", Working paper, Columbia Business School.
- Heal, G. (1998), *Valuing the Future: Economic Theory and Sustainability*, Columbia University Press.
- Hiriart, Y. et K. Schubert (1998), "Une croissance respectueuse des générations futures", in *L'environnement, une nouvelle dimension de l'analyse économique*, éd. par K. Schubert, et P. Zagamé, chap. VI, pp. 207–234, Vuibert, Paris.
- HM Treasury (2003), *The Green Book: Appraisal and Evaluation in Central Government*, HM Treasury, London.
- Koopmans, T. (1960), "Stationary Ordinal Utility and Impatience", *Econometrica*, 28, pp. 287–309.
- Koopmans, T. (1965), *On the Concept of Optimal Growth*, vol. 28, pp. 225–287, Pontificae Academiae Scientiarum Scripta Varia, Amsterdam/Chicago.
- Laibson, D. (1996), "Hyperbolic Discount Functions, Undersaving, and Savings Policy", *NBER Working Paper*, 5635.

- Laibson, D. (1997), "Golden Eggs and Hyperbolic Discounting", *Quarterly Journal of Economics*, 112, pp. 443-477.
- Li, C.-Z. et K.-G. Lofgren (2000), "Renewable Resources and Economic Sustainability: A Dynamic Analysis with Heterogeneous Time Preferences", *Journal of Environmental Economics and Management*, 40, pp. 236-249.
- Loewenstein, G. et D. Prelec (1992), "Anomalies in Intertemporal Choice: Evidence and an Interpretation", *Quarterly Journal of Economics*, 107, pp. 573-598.
- Michel, P. et G. Rotillon (1996), "Desutility of Pollution and Endogenous Growth", *Environmental and Resource Economics*, 6, pp. 279-300.
- Newell, R. et W. Pizer (2003): "Discounting the Distant Future: How much do Uncertain Rates increase Valuations?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 46, pp. 52-71.
- Pearce, D., B. Groom, C. Hepburn et P. Koundouri (2003), "Valuing the Future: Recent Advances in Social Discounting", *World Economics*, 4(2), pp. 121-141.
- Pittel, K. (2002), *Sustainability and Endogenous Growth*, Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Portney, P. R. et J. P. Weyant (1999), *Discounting and Intergenerational Equity*, Resources for the Future.
- Ramsey, F. P. (1928), "A Mathematical Theory of Saving", *Economic Journal*, 138, pp. 543-59.
- Thaler, R. (1981), "Some Empirical Evidence on Dynamic Inconsistency", *Economics Letters*, 8, pp. 201-207.
- Weitzman, M. (1998), "Why the Far Distant Future should be discounted at its Lowest Possible Rate", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36, pp. 201-208.
- Weitzman, M. (2001), "Gamma Discounting", *American Economic Review*, 91, pp. 260-271.
- Yang, Z. (2003): "Dual-rate Discounting in Dynamic Economic-Environmental Modeling", *Economic Modelling*, 20, pp. 941-957.

