L'effet d'irréversibilité en économie de l'environnement

J.-P. AMIGUES

Cahiers d'économie et sociologie rurales, n° 4, avril 1987

INTRODUCTION

La prise de décision en avenir incertain nécessite une prévision, la plus exacte possible, des rendements des différentes options en présence. Cela peut conduire à prendre en compte les opportunités d'apports d'informations supplémentaires sur ces rendements au cours du temps. En général, le choix devra se faire entre des options présentant des degrés de flexibilité différents.

En d'autres termes, une fois la décision prise, une modification ou un abandon de l'option choisie entraîne un coût plus ou moins important selon l'option. Dans ces conditions, l'existence d'opportunités d'informations futures peut conduire à préférer des options plus flexibles, bien que moins rentables au sens du critère de l'espérance du rendement.

L'existence d'une valeur intrinsèque de la flexibilité (quasi-valeur d'option dans la terminologie d' Arrow et Fisher) des décisions prises en avenir incertain apparaît dans un grand nombre de domaines de l'économie.

Le problème du choix entre investissements plus ou moins irréversibles a été étudié par Arrow, Beckmann et Karlin (1958), Arrow (1968), Nerlove et Arrow (1962). En particulier, ces auteurs montrent que l'irréversibilité des investissements modifie le sentier optimal d'accumulation du capital.

L'existence de coûts de transaction ou de liquidation des actifs sur le marché financier rend le choix d'un portefeuille d'actifs plus ou moins flexible. Même si les besoins de liquidité sont parfaitement prévus, les différentiels de coûts de transaction influencent la composition du portefeuille optimal (Baumol, 1952 ; Grossman, 1969).

Le comportement de la firme dans l'incertain est également influencé par l'irréversibilité des décisions à prendre : Kalecki (1937), Stigler (1939) et à sa suite Isdell (1968) formalisent la flexibilité des équipements par l'aplatissement, plus ou moins important, de la courbe de coût moyen.

Les risques associés à différentes options d'investissement peuvent varier au cours du temps. Se pose alors le problème d'évaluer les gains permis par les opportunités d'informations futures au moment de la décision. Cela conduit à distinguer risque et incertitude. Dans un tirage de dés, la probabilité d'obtenir un nombre quelconque est connue avec certitude, bien que le résultat du tirage soit aléatoire. On considérera comme risquée toute loterie assignant des gains certains aux différents tirages aléatoires. Toutefois, il n'existe pas d'incertitude dans une telle loterie. La notion d'incertitude est directement liée à la notion de certitude des croyances. L'origine de cette distinction peut être trouvée dans Knight (1921) et Keynes (1936).

Généralement, dans le cas d'options risquées mais d'aléas certains, l'évaluation des probabilités se fait sur des bases objectives alors que, dans le cas d'options incertaines, les agents économiques fondent leurs décisions sur des distributions de probabilités subjectives concernant les états de la nature. Toutefois, il faut se garder d'interpréter la distinction entre risque et incertitude selon le seul critère d'objectivité/subjectivité des croyances.

Les degrés d'incertitude des croyances varient d'un individu à un autre, mais aussi d'une structure d'information à une autre et d'un instant à l'autre.

Il est possible de classer, au moins partiellement, les croyances en termes de variabilité au cours du temps. Cette variabilité est mesurée par l'ampleur des révisions concernant les probabilités subjectives attachées aux différents événements possibles. Les agents économiques peuvent présenter des degrés d'aversion au risque différents et donc être plus ou moins sensibles à cette variabilité des croyances, mais la variabilité en elle-même ne dépend pas du risque. En particulier, on montre l'existence de coûts d'irréversibilité du choix de certaines options, même en l'absence de toute aversion pour le risque de la part du décideur.

Les effets des variations de degrés de risque sur la demande d'investissement ont été étudiés par Rothschild et Stiglitz (1971), Hartman (1972) et Nickell (1977). Le degré de variabilité des croyances (degré d'incertitude), l'aversion au risque, mais également de degré de flexibilité des décisions, jouent un rôle fondamental dans le choix d'un niveau d'investissement optimal.

Une autre manière d'aborder la relation entre incertitude et irréversibilité consiste à considérer les possibilités d'apprentissage ou de réduction d'incertitude au cours du temps. Il peut être intéressant de retarder certaines décisions ou de les fractionner si des informations plus précises sur les rendements réels de ces décisions peuvent être obtenues dans un futur proche. Le processus d'apprentissage est donc conditionné par l'existence d'options aux degrés de flexibilité suffisants. En particulier, l'apprentissage est inutile si tous les choix possibles sont soit totalement irréversibles, soit parfaitement interchangeables à coût nul (Hart, 1942 ; Hirshleifer, 1972 ; Hicks, 1974).

Hirshleifer (1972) introduit l'irréversibilité en analysant le problème des durées de maturation des investissements (cas de l'investissement dans des processus de recherche-développement, par exemple). L'importance de l'irréversibilité apparaît également lors du choix à l'intérieur d'un flux intertemporel d'opportunités d'investissements (Baldwin et Meyer, 1979).

En macro-économie, la notion d'irréversibilité joue un rôle important dans la théorie de la préférence pour la liquidité (Keynes, 1930 ; Tobin, 1950 ; Markowitz, 1957) et de la demande de monnaie. Les développements du modèle IS-LM par Hicks (1974) indiquent l'importance de la flexibilité dans la détermination conjointe de l'équilibre monétaire et de l'équilibre en terme réel. Signalons également les travaux de Bernanke (1979) sur l'influence de l'irréversibilité dans le choix des investissements et ses conséquences sur le cycle des affaires.

L'ensemble de ces études tend à montrer que, en général, la décision optimale doit être d'autant plus flexible que la variabilité de l'incertitude est grande. Par analogie avec la notion de prime de risque, on peut parler de prime de variabilité induite par l'incertitude, liée au degré de flexibilité des décisions. L'existence de cette prime ne dépend pas de l'attitude du décideur vis-à-vis du risque, même si son niveau varie avec l'aversion pour le risque.

L'intérêt du concept d'irréversibilité est assez évident en économie de l'environnement afin de mesurer l'impact d'aménagements irréversibles sur un espace naturel. La conservation d'une zone naturelle constitue une option réversible, ce qui n'est pas le cas généralement d'un projet d'aménagement (construction de barrages, d'autoroutes, etc.). Si la rentabilité attendue de l'aménagement est incertaine et si, en particulier, une information meilleure sur cette rentabilité peut être obtenue dans le futur, il peut être plus intéressant, du point de vue du calcul économique, de sauvegarder la zone et de choisir l'option « conservation ».

L'objet de cet article est d'étudier l'apport du concept d'irréversibilité à l'évaluation de l'impact de différentes politiques d'aménagement en matière d'environnement.

L'analyse des travaux de Arrow et Fisher (1974) sur l'évaluation des projets de développement affectant une zone naturelle fait l'objet de la première section. La deuxième section est consacrée à l'examen d'un exemple simple permettant de saisir intuitivement le problème. La troisième section aborde la formalisation rigoureuse du concept d'irréversibilité et de quasi-valeur d'option selon Henry (1974). La généralisation à des contextes informationnels plus complexes et le lien avec les équivalents certains au premier ordre sont établis dans une quatrième section. La cinquième section aborde les applications à l'économie de l'environnement du concept de quasi-valeur d'option.

IRRÉVERSIBILITÉ ET AMÉNAGEMENT DE L'ESPACE NATUREL

Arrow et Fisher (1974) considèrent le cas d'une zone totalement naturelle, susceptible de produire des bénéfices à l'état préservé. La notion de bénéfice utilisée ici doit être comprise au sens large, il s'agit de tout flux de services rendus par l'espace : chasse, pêche, services récréatifs, etc.

On envisage sur cette zone un développement bouleversant de manière irréversible, ou très difficilement réversible, l'espace naturel. Si l'on peut prévoir parfaitement les coûts et les bénéfices attendus du projet, il est possible, sous certaines conditions, de choisir entre développement et non-développement selon le critère de la maximisation des bénéfices nets attendus. Notons qu'un raisonnement analogue peut être mené si les bénéfices nets sont probabilisés : on maximise alors une espérance de gain [1].

Les auteurs raisonnent dans le cadre d'un modèle à deux périodes. A la première période, le décideur public doit engager ou non le développement d'une fraction de la zone d_1. Les bénéfices de la préservation et du développement à la fin de la première période (b_p et b_d) sont aléatoires.

Au début de la second période, le décideur observe b_p et b_d. Il doit alors décider de poursuivre ou non le développement. Soit d_2 la fraction développée à la seconde période ; la conservation et le développement à la seconde période produisent des bénéfices conditionnés par les gains et donc les décisions prises à la première période. Noton β_p et β_d ces bénéfices conditionnels.

Le développement est irréversible : tout aménagement entrepris à la première période ($d_1>0$) ne peut qu'être stoppé ($d_2=0$). Soient c_1 et c_2 les coûts d'investissements aux deux périodes. On suppose donc que l'option « préservation » n'induit aucun coût. Cette hypothèse sert à clarifier l'exposé mais ne modifie pas le sens des résultats. Remarquons également qu'il s'agit de bénéfices unitaires supposés constants (hypothèse de rendements constants du projet de développement). Cette hypothèse peut être relâchée sans altérer les résultats de l'analyse.

Arrow et Fisher supposent également que le décideur est neutre vis-à-vis du risque. Les options en présence ne diffèrent entre elles que par leurs bénéfices attendus et leurs degrés de réversibilité différents, ce qui va permettre de caractériser l'effet propre de l'irréversibilité.

Le processus décisionnel est le suivant :

En se basant sur l'information acquise à la seconde période, on détermine la fraction d_2 qui maximise les bénéfices attendus, conditionnés par les bé-

[1] Pour un exposé du problème posé par l'usage des équivalents certains en théorie de la décision, cf. Malinvaud (E.), 1969. – « Décisions en face de l'aléatoire et situation certaine approximativement équivalente », *Cahiers du séminaire de la Société d'économétrie*, 11.

néfices réalisés à la première période. En normalisant la surface de la zone à 1, on obtient la solution :

$$d_2 = \begin{cases} 1 - d_1 \text{ si } \beta_d - \beta_b > c_2 \\ 0 \qquad \text{si } \beta_d - \beta_b < c_2 \end{cases}$$

Il est alors possible de déterminer le gain optimal de seconde période en fonction de d_1, puis de maximiser le gain total sur les deux périodes en fonction de la seule décision d_1 (méthode de programmation dynamique stochastique).

Soit $w = b_d - b_b - c_1$ et $z = \beta_d - \beta_b$, les différentiels (aléatoires) de bénéfices nets à la première période et de bénéfices conditionnels à la seconde période, et soit A l'événement $Z > c_2$ (on a intérêt à développer à la seconde période).

L'espérance de bénéfices attendus d'un développement ($d_1 > 0$) à la première période est donc :
$E \{[\omega + \min (c_2, z)]\, d_1 + b_b + \max (\beta_d - c_2, \beta_b)\}$.

Les bénéfices attendus d'une préservation ($d_1 = 0$) à la première période sont :

$$\begin{cases} b_p + \beta_d - c_2 \text{ si A se produit,} \\ b_p + \beta_b \qquad \text{si A ne se produit pas,} \end{cases}$$

soit une espérance de gain de $E \{b_p + \max (\beta_d - c_2, \beta_b)\}$.

L'espérance de la différence de gain entre développement et préservation à la première période est donc :

$E \{[\omega + \min (c_2, z)] d_1\}$

dont le signe détermine la décision optimale ($d_1 > 0$ si $>= 0$ et $d_1 = 0$ si $<= 0$).

Supposons que le décideur ne tienne pas compte de la possibilité d'utiliser l'information disponible à la fin de la première période et décide de programmer au début de la première période la totalité de son investissement d'aménagement.

En se basant sur l'information disponible au début de la première période, son critère de choix (critère d'équivalents certains) est :

$E [\omega] + \min (c_2, E [z])$

qui se présente comme la somme aux deux périodes des différences d'espérances de gains permis par les deux options.

Considérons le cas $c_2 < E[z]$ (il est intéressant de développer à la seconde période), le critère devient $E[\omega] + c_2$. Il est assez clair que $P[\min (c_2, z) < c_2] > 0$, auquel cas $E [\min (c_2, z)] < c_2$, d'où l'on déduit :

$E [\omega + \min (c_2, z)] < E[\omega] + c_2$.

Il peut dès lors se faire que $E [\omega + \min (c_2, z)]$ soit négatif et $E[\omega] + c_2$ soit positif. Dans ce cas, ne pas tenir compte de l'incertitude, c'est-à-dire raisonner en équivalents certains et adopter le second critère, peut conduire à choisir le développement ($d_1 > 0$ si $E[\omega] + c_2 > 0$), alors que la prise en compte de l'information future conduirait à abandonner le projet de développement à la première période ($d_1 = 0$ si $E[\omega + \min (c_2, z)] < 0$), quitte à investir à la seconde période ($d_2 > 0$ si $c_2 < E[z]$).

Dans tous les cas, l'équivalent certain de la valeur des bénéfices nets attendus de l'aménagement est supérieur à la valeur des bénéfices sous incertitude. Sur la base de l'information disponible au début de la seconde période, il est possible de corriger un sous-investissement effectué à la première période, alors qu'un surinvestissement est irréversible. Même en l'absence de toute aversion au risque, il apparaît une quasi-valeur d'option positive, liée à la conservation de l'espace en l'état, si les bénéfices attendus du développement sont incertains et l'aménagement irréversible.

Nous allons maintenant examiner sur un exemple simple certaines propriétés de cette quasi-valeur d'option.

L'EFFET D'IRRÉVERSIBILITÉ

Considérons un problème de décision dans l'incertain à deux périodes ayant la structure suivante.

Au début de la première période, la nature tire dans S, l'espace des états de la nature, un élément s_i. Sans connaître l'état dans lequel il se trouve, un agent doit décider d'une action a, $a \in A$, où A désigne l'ensemble des actions possibles à la première période. A la seconde période, l'agent reçoit une information parfaite concernant l'état de la nature dans lequel il se trouve.

Sur la base de cette information, il choisit une action $b \in B$ à la seconde période. Supposons que l'agent soit neutre vis-à-vis du risque, son objectif est de déterminer la séquence d'actions (a,b) maximisant ses gains aux deux périodes. La notion d'irréversibilité des décisions peut être introduite en supposant que le choix de certaines actions, $a \in A$, a pour effet de réduire l'espace des actions possibles $b \in B$. Considérons un cas très simple où $A = \{a_1, a_2\}$, $B = \{b_1, b_2\}$ et $S = \{s_1, s_2\}$. A la première période, les gains permis par $a \in A$ dans les deux états s_1 et s_2 sont respectivement :

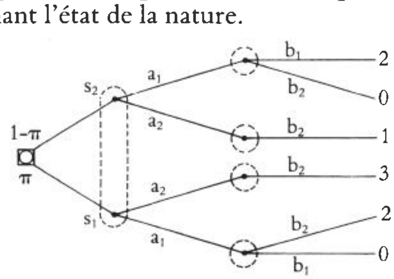
$$\begin{cases} u_1\,(a_1) = 0 & \forall\ si \in S \\ u_1\,(a_2) = 1 & \forall\ si \in S \end{cases}$$

Dans ce cas particulier, les gains à la première période sont supposés certains. A la seconde période, le choix de a_2 à l'étape précédente interdit le choix de l'action b_1. Les gains de seconde période sont :

$$u_2\,(b_1) = \begin{cases} 0 & \text{si } s = s_1 \\ 2 & \text{si } s = s_2 \end{cases} \qquad u_2\,(b_2) = \begin{cases} 2 & \text{si } s = s_1 \\ 0 & \text{si } s = s_2 \end{cases}$$

Notons π la probabilité a priori d'être dans l'état s_1 pour l'agent.

Le processus décisionnel peut être résumé par l'arbre suivant, où les nœuds reliés en pointillé représentent les ensembles d'informations de l'agent aux deux périodes. A la première période, l'agent dispose d'un ensemble d'informations contenant deux nœuds correspondant aux états qu'il ne peut distinguer. A la seconde période, on suppose que l'agent a une mémoire parfaite des actions entreprises à l'étape antérieure et qu'il reçoit une information complète concernant l'état de la nature.



Dans ces conditions, il dispose de quatre ensembles d'informations, un pour chaque situation possible, ce qui correspond à une information complète, l'agent étant capable de distinguer toutes les possibilités de situation.

L'agent doit utiliser l'accroissement d'information disponible afin de déterminer une séquence d'actions (a,b) qui maximise ses gains sur les deux périodes. La résolution du problème s'effectue récursivement de la dernière période vers la première. Pour toutes les situations possibles à l'issue de la première étape, choisissons la décision $b_i \in B$ qui maximise les gains à la seconde étape. On obtient immédiatement la solution suivante :

$$b^\star(a,s) \begin{cases} = b_2 \text{ si } a = a_1 \text{ et } s = s_1 \\ = b_2 \text{ si } a = a_2 \text{ et } s = s_1 \\ \\ = b_1 \text{ si } a = a_1 \text{ et } s = s_2 \\ = b_2 \text{ si } a = a_2 \text{ et } s = s_2 \end{cases}$$

Le problème consiste alors à déterminer une action optimale $a^\star \in A$, à la première étape, qui maximise l'espérance de gains sur les deux périodes pour la distribution de probabilités a priori spécifiée.

Les espérances de gains des deux options possibles sont alors respectivement :

$E[J(a_1)] = 0 + 2\pi + 2(1-\pi) = 2$
$E[J(a_2)] = 1 + 2\pi + (0)(1-\pi) = 1 + 2\pi$

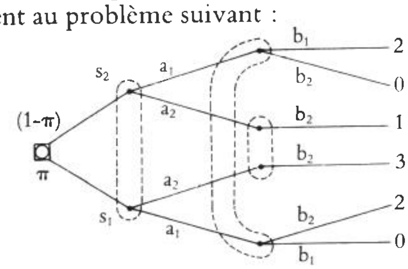
On en déduit immédiatement la solution optimale à la première période :

$$a^\star = \begin{cases} a_1 \text{ si } \pi<1/2 \\ a_2 \text{ si } \pi>1/2 \end{cases}$$

L'option a_2 est irréversible (il n'est possible d'entreprendre que b_2 si on a choisi a_2). Cette option procure un gain immédiat $u_1(a_2)>0$ alors que l'option a_1 ne procure aucun gain. A la seconde étape, dans l'état s_1, la stratégie optimale quelle que soit l'action entreprise à la première période est b_2. Dans ce cas, il vaut mieux choisir l'option irréversible qui n'interdit pas d'entreprendre b_2 et procure un gain supplémentaire. Inversement, dans l'état 2, c'est l'action b_1 qui est intéressante, à condition d'avoir choisi a_1 à la première période.

Selon les valeurs des probabilités a priori le choix se portera soit sur a_2 suivi de b_2 obligatoirement, soit sur a_1 suivi de b_1.

Considérons maintenant le problème d'un décideur qui ne prend pas en compte l'opportunité d'utiliser l'information disponible à la fin de la première étape. Dans ces conditions, l'agent doit déterminer à la première période une séquence d'actions optimales (a,b) en se basant sur l'information a priori disponible à cette étape. D'un point de vue informationnel, ce problème est équivalent au problème suivant :



A la seconde étape, l'agent se rappelle avoir choisi a_1 ou a_2 précédemment, mais il est incapable de distinguer le fait d'avoir choisi a_1 et d'être dans l'état s_1, du fait d'avoir choisi a_1 et d'être dans l'état s_2. Un phénomène analogue se produit concernant l'action a_2.

En raison de l'irréversibilité induite par le choix de a_2, l'agent dispose de trois séquences d'actions : (a_1,b_1), (a_1,b_2) et (a_2,b_2). Les espérances de gain associés à ces séquences sont :

$$E[J(a_1,b_1)] = \pi(0) + 2(1-\pi) = 2-2\pi$$
$$E[J(a_1,b_2)] = 2\pi + (0)(1-\pi) = 2\pi$$
$$E[J(a_2,b_2)] = 3\pi + (1-\pi) = 2\pi + 1$$

Pour toute probabilité $\pi \geqslant 0$, l'option (a_2,b_2) domine l'option (a_1,b_2). La solution optimale est :

$$(a^\star,b^\star) = \begin{cases}(a_1,b_1) \text{ si } \pi<1/4 \\ (a_2,b_2) \text{ si } \pi>1/4\end{cases}$$

Comparons la solution obtenue par la programmation dynamique en tenant compte de l'incertitude (c'est-à-dire de la variabilité de l'information), à la solution sans incertitude, en équivalents certains.

	0 1/4	1/2	1
Sol. I : approximativement certaine	a_1,b_1	a_2,b_2	a_2,b_2
Sol. II : incertitude	$a_1, \begin{cases}b_1 & \text{si } s_2 \\ b_2 & \text{si } s_1\end{cases}$	$a_1, \begin{cases}b_1 & \text{si } s_2 \\ b_2 & \text{si } s_1\end{cases}$	a_2,b_2
Sol. I : gains optimaux	$2-2\pi$	$2\pi+1$	$2\pi+1$
Sol. II : gains optimaux	2	2	$2\pi+1$

Pour des probabilités d'occurrence de l'état 1 supérieures à 1/2, les solutions sont identiques et conduisent à des décisions irréversibles. En revanche, pour des probabilités comprises entre 1/4 et 1/2, la prise en compte de la variabilité de l'information conduit à choisir l'option la moins irréversible, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on raisonne en équivalents certains.

Il est possible sur cet exemple d'évaluer la quasi-valeur d'option relative au choix d'une option moins irréversible. La quasi-valeur d'option est égale à la différence entre l'espérance de bénéfices a posteriori de l'option réversible et l'espérance de gain de l'option la plus irréversible soit :

$$QVO = 2 - (2\pi+1) = 1 - 2\pi \qquad \forall\pi\in]1/4, 1/2[$$

On peut faire les remarques générales suivantes concernant la quasi-valeur d'option :

– Le signe de QVO est positif, ce qui signifie que le choix de l'option réversible a_1 à la première période permettant d'utiliser le gain d'information du début de la seconde période présente un intérêt, même si l'option a_1 ne permet aucun gain à la première période.

– La quasi-valeur d'option dépend des probabilités a priori sur les états de la nature. En particulier, pour une valeur de π élevée (probabilité d'occurrence de s_1 élevée), la quasi-valeur d'option est faible, reflétant le fait qu'en s_1, c'est l'option irréversible a_2 qui est la plus intéressante. La quasi-valeur d'option est donc d'autant plus forte que le « risque » de se tromper en choisissant l'option irréversible est élevée.

– La quasi-valeur d'option varie également avec le degré d'aversion pour le risque de l'agent.

VALEUR D'OPTION ET QUASI-VALEUR D'OPTION

Pour Henry (1974), la quasi-valeur d'option qu'il nomme valeur d'option naît de la conjonction de trois facteurs :

- il y a incertitude sur le futur ;
- certaines décisions sont plus irréversibles que d'autres ;
- le processus de décision est séquentiel et l'on peut exploiter des gains d'information acquis dans le futur.

Henry montre que ces trois facteurs sont suffisants pour faire apparaître une valeur d'option positive au choix de décisions moins irréversibles, ceci pour un nombre quelconque de périodes et pour un nombre de décisions possibles et d'états de la nature fini ou infini.

Raisonnant dans un premier temps dans le cadre d'un modèle à deux périodes, il considère le problème d'un décideur qui doit choisir simultanément un état de son environnement et un niveau de revenu dépendant de l'environnement par le biais d'une fonction de production $Y=f(D)$. Cette fonction est supposée strictement décroissante et concave. En d'autres termes, le décideur doit arbitrer entre un environnement préservé procurant un revenu faible et un environnement aménagé de qualité dégradée, mais procurant un revenu élevé.

Comme dans notre exemple de départ, le problème du choix d'un couple optimal (Y,D) se formule différemment selon que le décideur tient compte ou non de la possibilité d'acquérir de l'information sur l'état de la nature au début de la seconde période.

Lorsqu'il ignore cette possibilité, il cherche un couple d'actions qui maximise son espérance de gain sur les deux périodes. Son problème s'écrit formellement :

$$(\mathrm{I}) \begin{cases} \text{Max} \\ Y^1,\, D^1,\, Y^2,\, D^2 \\ s/c \end{cases} \qquad U^1(Y^1,D^1) + \int_\Omega U^2(Y^2,D^2,\omega)\, d\mu\,(\omega)$$

$$Y^1 = f^1(D^1)$$
$$Y^2 = f^2(D^2)$$
$$D^2 \leq D^1 \qquad (Y^1,\, D^1,\, Y^2,\, D^2) \in \mathbb{R}^{4+}$$

où $U^1(.)$ et $U^2(.)$ sont respectivement les fonctions d'utilité de l'agent à la première et à la seconde période ; ω est un état de la nature, Ω l'espace des états de la nature et $\mu(.)$ une mesure sur Ω. $f^1(.)$ et $f^2(.)$ désignent respectivement les fonctions de production décrivant les niveaux de revenu permis par l'aménagement de l'environnement naturel. La contrainte $D^2 \leq D^1$ exprime l'irréversibilité de la dégradation de l'environnement choisie à la première période.

Pour simplifier, supposons une information parfaite sur ω à la fin de la première étape. Si le décideur prend en compte l'information disponible, il choisit un quadruplet optimal $(Y^1,\, Y^2,\, D^1,\, D^2)$ en deux temps.

Il résout le problème (certain) suivant à la deuxième période paramétré par les décisions de la première période et supposé connu.

$$(\text{II.a}) \begin{cases} \underset{Y^2,\, D^2}{\text{Max}}\ U^2\,(Y^2, D^2, \omega) \\ \text{s/c} \qquad Y^2 = f^2\,(D^2) \\ \qquad\quad D^2 \leqslant D^1\ (Y^2, D^2) \in \mathbb{R}^{2+} \end{cases}$$

Puis, il porte les solutions $(\hat{Y}^2, \hat{D}^2)$ de ce problème dans le problème suivant relatif à la première étape :

$$(\text{II.b}) \begin{cases} \underset{Y^1,\, D^1}{\text{Max}}\ U^1(Y^1, D^1) + \int_\Omega U^2(Y^2(D^1,\omega)\ ;\ D^2(D^1,\omega)\ ;\ \omega)\ d\mu(\omega) \\ \text{s/c} \qquad Y^1 = f^1(D^1) \qquad (Y^1, D^1) \in \mathbb{R}^{2+} \end{cases}$$

Soit $\hat{D}^1$ une solution de (II.b) et $D^{\star 1}$ une solution du problème approximativement certain (I). Sous réserve d'existence de telles solutions, Henry montre que lorsque les fonctions d'utilité sont strictement quasi-concaves :

$$\hat{D}^1 \geqslant D^{\star 1}$$

Le niveau de qualité de l'environnement choisi à la première période D_1 sera plus élevé si l'on tient compte de l'information que si l'on n'en tient pas compte. La quasi-concavité stricte de l'utilité est cruciale pour l'obtention de ce résultat comme Henry le montre à partir d'un contre-exemple (cf. également, Freixas, Laffont, 1983).

Dans un autre article traitant du même sujet, Henry (1974) montre, dans le cadre d'un modèle multipériodique, l'existence de l'effet d'irréversibilité pour une structure intertemporelle d'information donnée.

D'un point de vue mathématique, l'apparition d'une quasi-valeur d'option de la réversibilité ou de la conservation découle des propriétés générales des solutions des problèmes de contrôle optimal. Lorsque le décideur ne tient pas compte de l'information, il annonce à la date $t = o$ une séquence de décisions qui maximisent l'espérance de ses gains sur toutes les périodes où il agit.

Lorsqu'il tient compte de l'information, il calcule récursivement de la dernière à la première période, une séquence d'actions à chaque étape paramétrées par les décisions passées. Les solutions du premier problème, dites solutions en boucle ouverte dans la terminologie de la théorie du contrôle, forment un sous-ensemble des solutions du second problème. De plus, les valeurs optimales du critère dans le second problème sont au moins égales aux valeurs optimales du critère du premier problème. Il apparaît donc un gain à l'optimum permis par la prise en compte de l'incertitude i.e. de la variation de l'information au cours du temps. Ce gain sera strictement positif en présence d'irréversibilité de certaines décisions sous l'hypothèse de quasi-concavité stricte de la fonction-critère (Crabbé, 1985).

Les structures d'information étudiées jusqu'à présent étaient relativement stylisées. Dans le cadre du modèle à deux périodes, le décideur recevait une information parfaite sur l'état de la nature avant de choisir une action à la deuxième période. Il convient maintenant d'étudier son comportement dans un contexte informationnel plus général. Plusieurs voies d'approche sont possibles. Jones et Ostroy (1984) ont proposé une analyse du problème, séduisante par sa simplicité, qui met en évidence, là encore, l'importance de l'hypothèse de concavité de la fonction-critère.

IRRÉVERSIBILITÉ ET INCERTITUDE

Jones et Ostroy donnent du problème une vision plus large en introduisant les croyances du décideur. Une croyance est définie comme une mesure de probabilité sur les états de la nature, conditionnée par la réception d'un certain message. Formellement, considérons S, l'espace des états de la nature, Y un ensemble de messages ou d'observations. Soit Δ_s et Δ_y, les espaces de mesures de probabilité respectivement sur S et Y. On définit un ensemble de croyances par la donnée d'un couple (π,q) où π est une matrice de colonnes $\pi(y)$, $y \in Y$ et $\pi \in \Delta_s$ et $q \in \Delta_y$. (π,q) est appelée structure d'information et spécifie, pour chaque mesure de probabilité d'observation d'un message dans Y, la probabilité conditionnelle pour l'agent d'être dans un état donné lorsqu'il a reçu ce message. La moyenne de (π,q) est appelée « a priori » et désigne la distribution de probabilité sur les états de la nature adoptée avant réception de tout message. L'observation d'un message conduit à réviser ses croyances sur les états de la nature. Ces révisions seront plus ou moins importantes selon la nature du message et la nature des croyances précédemment adoptées. On dira qu'une structure d'information (π,q) est plus variable qu'une autre (π',q') lorsque la réception d'un message y produit une plus grande révision des croyances dans (π,q) que dans (π',q'). Formellement, on définit la variabilité comme une relation d'ordre partiel notée $\gtrsim$ telle que :

$$(\pi,q) \gtrsim (\pi',q') \Rightarrow \begin{cases} \text{(i)}\Sigma q_y \phi(\pi(y)) \geqq \Sigma q'_y \phi(\pi'(y)) \\ \text{où } \phi : \Delta_s \rightarrow \mathbb{R} \text{ est une fonction} \\ \qquad\qquad \text{convexe quelconque} \\ \text{(ii)}\Sigma q_y \pi(y) = \Sigma q'_y \pi'(y) \end{cases}$$

Remarquons que cette relation ne permet pas un classement complet de toutes les structures d'information possibles. Toutefois, cette définition de la variabilité prend en compte deux caractéristiques fréquentes de l'incertitude en économie. D'une part, la qualité des informations peut s'améliorer, ceci concerne q_y, la probabilité d'observer un message $y \in Y$. D'autre part, si l'information a priori est faible, la réception de n'importe quel message peut entraîner des modifications importantes des croyances.

Si le classement des structures d'information en terme de structures plus ou moins variables est moins rigoureux que le classement en terme de structures plus ou moins informatives (Blackwell, 1953), il s'avère plus simple et mieux approprié à l'étude de l'effet d'irréversibilité.

D'une manière symétrique, les auteurs définissent ensuite un préordre sur les actions du décideur. Considérons un problème de décisions à deux étapes où l'agent, après avoir choisi une action $a \in A$ à la première étape, doit choisir une action $b \in B$ à la seconde, après réception d'un message $y \in Y$ concernant l'état de la nature $s \in S$. Une action $a \in A$ sera dite plus flexible qu'une autre action $a' \in A$, si le coût de passage d'une option $b \in B$ à une autre est plus faible lorsque l'on a préféré a à a'.

La fonction de gain du décideur est définie de la manière suivante :

$f(a,b,s) = r(a,s) + u(b,s) - c(a,b,s)$

où r(.) désigne le gain de première période, u(.) le gain de seconde période et c(.) le coût de passage de a à b.

Notons :

G l'ensemble des applications de $A \times S \times \mathbb{R}$ dans B telles que :

$G(a,s,\alpha) = \{b \mid c(a,b,s) \leqslant \alpha\}$.

G(.) désigne l'ensemble des actions $b \in B$ qu'il est possible d'entreprendre à la deuxième étape, à un coût n'excédant pas α, lorsque l'on a choisi $a \in A$ à la première étape.

Notons g une application de A dans B telle que :

$g(a) \in G(a,s,o) \qquad \forall (a,s) \in A \times S$

Le graphe de g(a) contient toutes les actions $b \in B$ qu'il est possible de choisir à coût de passage nul dans un état s quelconque.

Une décision a sera dite plus flexible qu'une autre a' lorsque :

$\forall\ \alpha \geqslant 0\ \forall s \in S\ G(a,s,\alpha) \supset G(a',s,\alpha) \setminus g(a')$.

Pour un coût donné α, l'ensemble des actions possibles après a contient l'ensemble des actions possibles après a' hormis les actions à coûts de passage nuls.

Le problème du décideur est de déterminer une séquence d'actions qui maximise ses gains sur les deux périodes en tenant compte du message reçu à l'issue de la première étape. Soit $J(\pi,q)$ son gain optimal :

$$J(\pi,q) = \underset{a \in A}{\mathrm{Max}} \sum_y q_y \underset{b \in B}{\mathrm{Max}} \sum_s \pi_s(y) f(a,b,s)$$

Notons :

$$v(a,\pi(y)) = \underset{b \in B}{\mathrm{Max}} \qquad \sum_s \pi_s(y)\ (u(b,s) - c(a,b,s))$$

l'espérance de gain optimal de la seconde période J(.) peut être réécrite :

$$J(\pi,q) = \underset{a \in A}{\mathrm{Max}} \{\sum_s \overline{\pi}_s\, r(a,s) + \sum_y q_y\, v(a,\pi(y))$$

où $\overline{\pi}_s$ désigne l'a priori sur s.

Jones et Ostroy démontrent la proposition suivante. Considérons deux choix optimaux a et a' relatifs respectivement aux structures d'information (π,q) et (π',q'). Si a plus flexible que a' implique que $[v(a,\pi) - v(a',\pi)]$ est convexe en s, pour tout a et a' dans A alors, si (π,q) est plus variable que (π',q'), a est plus flexible que a'.

En d'autres termes, à des structures d'information plus variables doivent être associées des décisions plus flexibles. Cela généralise les résultats précédents concernant la prise en compte de l'irréversibilité des décisions en présence d'incertitude à des structures d'information quelconques.

Remarquons que ce résultat n'est acquis que sous certaines hypothèses concernant les structures d'information (la variabilité ne permet qu'un classement partiel) ; les séquences d'actions (la flexibilité doit entraîner la convexité des différences de gains de seconde période) et la structure des coûts de passage.

A ce point, il est possible d'établir un bilan provisoire des apports de la théorie micro-économique à l'analyse de l'irréversibilité.

Pour un nombre de situations économiquement pertinentes, il apparaît une valeur nommée quasi-valeur d'option, positive, au choix d'options réversibles (i.e. flexibles) en présence d'incertitude (i.e. de variabilité des croyances). Le calcul économique de la rentabilité des différentes options en termes d'équivalents certains peut conduire à des erreurs d'appréciation, car il ne prend pas en compte la possibilité de fractionner le problème décisionnel pour tenir compte d'opportunités d'informations sur les gains réels attendus de chaque option.

C'est la possibilité de séquencer les décisions qui conduit à s'intéresser aux degrés d'irréversibilité (i.e. non-flexibilité) présentés par les actions à entreprendre en premier lieu.

Cette analyse s'applique donc également à des problèmes de choix de la date de prise de décision. Les options à considérer étant le laisser-faire, option réversible, et l'action aux conséquences plus irréversibles. Lorsque plusieurs actions ne peuvent être entreprises simultanément, il est nécessaire de spécifier un ordre optimal d'exécution, comme par exemple dans le choix d'une séquence de décisions d'investissements lourds (Freixas, 1987).

IRRÉVERSIBILITÉ ET ENVIRONNEMENT

L'intérêt de l'analyse en termes d'irréversibilité des décisions d'aménagement d'espaces naturels ou d'actions sur l'environnement est assez évident.

D'une part, l'effet d'irréversibilité fournit une base rationnelle à ceux qui mettent en avant l'importance de la conservation d'espaces naturels. D'autre part, la quasi-valeur d'option de la conservation peut en principe être calculée sous l'hypothèse de neutralité envers le risque et permettre ainsi d'affiner des critères de choix entre conservation et aménagement ou entre divers degrés d'aménagement.

Deux voies de recherche ont été essentiellement explorées par les spécialistes d'économie de l'environnement depuis l'étude pionnière de Fisher, Krutilla et Cichetti (1972). D'une part, un certain nombre d'études empiriques ont porté sur la mesure de la quasi-valeur d'option dans des cas particuliers ; d'autre part, certains auteurs ont tenté d'approfondir l'analyse de l'effet d'irréversibilité pour des problèmes spécifiques d'environnement.

La mesure de la valeur d'option est bien évidemment étroitement dépendante de la qualité des projections sur les revenus futurs des options en présence. Comme le démontre l'article de 1972, certaines mesures sont par essence sujettes à controverse. Ainsi, pour évaluer l'irréversibilité de la décision de construire un barrage détruisant la flore particulière du Hells Canyon dans le Colorado, il était nécessaire d'estimer la rentabilité des différentes solutions de substitution.

Le choix de telles solutions – autres sites, autres choix techniques pour produire l'énergie électrique – ne peut échapper totalement à l'arbitraire, notamment en raison des hypothèses nécessaires concernant la disponibilité présente et future des ressources impliquées dans ces solutions de substitution.

Dans le cas du barrage de Hells Canyon, l'incertitude provient en partie de l'impossibilité de prévoir avec suffisamment de précision l'évolution de la demande d'énergie à long terme et l'évolution des prix relatifs des différentes sources d'énergie. S'il est possible, sur la base de l'information actuellement disponible, de calculer la valeur a priori d'un investissement de cette nature, l'estimation de la quasi-valeur d'option implique le calcul a posteriori, une fois l'information disponible, de cette valeur.

Dans la pratique, une telle évaluation passe par des simulations de décisions sous différents scénarios d'évolution des coûts et de la demande d'énergie.

La mesure des bénéfices retirés de la conservation de l'espace naturel constitue un problème tout aussi redoutable. Non seulement ces bénéfices doivent être estimés dans le présent, mais également évalués dans le futur. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthodologie rigoureuse permettant d'effectuer de telles mesures [(2)]. Cela conduit souvent les experts économiques à des choix arbitraires et donc contestés (voir à ce sujet la controverse entre Fisher et al. (1972), Cummings et Norton (1974), Abrassart et Mc Farlane (1974) concernant l'aménagement du Hells Canyon).

Parmi les études concernant l'évaluation des irréversibilités induites par de grands projets de barrage, citons celle de Crabbe (1985) concernant la vallée du Kootenay en Colombie britannique. L'intérêt de cette étude est renforcé par l'existence d'un traité entre le Canada et les États-Unis sur l'aménagement du fleuve Columbia. La construction d'un tel barrage affectant les ressources en eau de la rivière Columbia qui passe du Canada aux États-Unis, le Canada s'est engagé par traité à n'affecter le débit du fleuve que dans des limites précises spécifiées par rapport au temps.

L'irréversibilité en économie de l'environnement a également fait l'objet de divers approfondissements théoriques. Miller et Lad (1984) ont aussi montré que lorsque les décisions par elles-mêmes permettent d'obtenir de l'information sur leurs rendements futurs, un processus actif de recherche se substitue à un processus d'apprentissage passif. Ce processus peut conduire à préférer des options irréversibles, si elles permettent une réduction substantielle d'incertitude. Dans ce cas, la quasi-valeur d'option devient négative (Freeman, 1984). Brown et Goldstein (1984), dans leur article concernant l'évaluation des espèces en danger de disparition, font appel à l'incertitude sur les revenus futurs permis par la conservation de ces espèces pour justifier leur protection. Bien que ne faisant pas directement référence à la notion de quasi-valeur d'option, leur analyse est très proche de celle de Arrow et Fisher (cf. également Smith et Krutilla, 1979).

*
**

(2) Sur les problèmes empiriques soulevés par de telles évaluations, cf. en outre KRUTILLA et FISHER (1975) : "The economics of natural environment: studies in the evaluation of commodity and amenity resources", *in : Resources for the Future,* JH Press.

CONCLUSION

La mise en évidence d'une valeur, le plus souvent positive, de la conservation d'environnements naturels, en raison de l'incertitude sur les gains futurs des options « conservation » et « aménagement » a fait l'objet de nombreuses études en économie de l'environnement. Certains auteurs ont même cherché dans la valeur d'option un équivalent à la notion de patrimoine naturel.

Il semble toutefois que les difficultés de mesure empirique de la quasi-valeur d'option doivent inciter à la prudence dans l'application de ce concept au calcul économique.

Relevons l'importance des hypothèses de concavité des fonctions d'évaluation qui restreint la pertinence économique d'une analyse en termes de flexibilité.

Par ailleurs, la mesure des gains attendus des différentes options est soumise aux contraintes habituelles sur les propriétés des prix, et des marchés supportant ces prix, servant de base à cette évaluation.

En particulier, si le projet d'aménagement irréversible est générateur d'effets externes négatifs sur l'environnement, ces effets ne sont pas pris en compte au niveau du calcul économique privé et ils n'apparaissent pas dans l'expression de la quasi-valeur d'option relative à la conservation de l'espace naturel. Leur prise en compte conduirait à accroître cette valeur d'option et constitue un argument supplémentaire en faveur de la protection de l'environnement.

Quel peut être l'apport du concept d'irréversibilité à l'analyse de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement ?

Certaines pratiques agricoles prolongées peuvent avoir pour conséquence des transformations difficilement réversibles de l'environnement (phénomènes d'érosion, conséquences d'un défrichement accéléré, concentration progressive de nitrates dans les couches profondes du sol). Toutefois, les pratiques agricoles sont de nature essentiellement réversible : des zones cultivées peuvent rapidement revenir en friche, les apports d'engrais peuvent être réduits...

Il n'en est pas de même des investissements agricoles dont les rentabilités sont sensibles à l'incertitude sur les revenus futurs de l'exploitation (fluctuations des cours, possibilités d'excédents, risques climatiques). L'étude des décisions d'investissement agricole en avenir incertain présente donc un vaste champ d'application au concept d'irréversibilité.

*
**

BIBLIOGRAPHIE

ARROW (K.J.), FISHER (A.C.), 1974. – "Preservation, uncertainty and irreversibility", *Quarterly Journal of Economics*, 89.

BLACKWELL (D.), 1953. – "Equivalent comparison of experiments", *Annals of Mathematics and Statistics*, 24.

BROWN (G.), GOLDSTEIN (J.H.), 1984. – "A model for valuing endangered species", *Journal of Environmental Economics and Management*, 11.

CRABBE (P.), 1985. – « Valeurs d'option et de quasi-option des ressources naturelles », *Green*, cahier 8501, Faculté des Sciences sociales de Laval, Québec.

FISHER (A.C.), KRUTILLA (J.V.), CICCHETTI (C.H.), 1972. – "The economics of environmental preservation. A theoretical and empirical analysis", *American Economic Review*, 62.

FISHER (A.C.), KRUTILLA (J.V.), 1974. – "Valuing long run ecological consequences and irreversibilities", *Journal of Environmental Economics and Management*, 1.

FREEMAN (A.M.), 1984. – "The quasi-option value of irreversible development", *Journal of Environmental Economics and Management*, 11.

FREIXAS (X.) et LAFFONT (J.J.), 1982. – "The irreversibility effect", *in* BOYER, KILHSTROM (éd.) – *Bayesian models in Economic Theory*, North-Holland.

GREENLEY (J.A.), WALSH (R.G.), YOUNG (R.A.), 1981. – "Option value: empirical evidence from a case study of recreation and water quality", *Quarterly Journal of Economics*, 96.

HENRY (C.), 1974 – "Option values in the economics of irreplaceable assets", *Review of Economic Studies*, 41.

HENRY (C.), 1974. – "Investment decision under uncertainty: the irreversibility effect", *American Economic Review*, 64.

JONES (R.A.), OSTROY (J.M.), 1984. – "Flexibility and uncertainty" [(3)], *Review of Economic Studies*, 60.

MILLER (J.R), LAD (F.), 1984. – "Flexibility, learning and irreversibility in environmental decision. A Bayesian approach", *Journal of Environmental Economics and Management*, 11.

SMITH (V.K.), KRUTILLA (J.V.), 1979. – "Endangered species, irreversibilities and uncertainty: a comment", *American Journal of Agricultural Economics, 61.*

[(3)] Cet article contient un survol très documenté de la littérature sur l'irréversibilité ainsi qu'une bibliographie très complète regroupant les auteurs cités dans l'introduction.