



Faculté d'Economie Appliquée
3, Avenue Robert Schuman, Salle 005
13628 Aix-en-Provence Cedex 1

IRREVERSIBILITE MIXTE ET MODULARITE : UNE APPLICATION A L'INVESTISSEMENT ELECTRONUCLEAIRE

Karine Fiore

Documents de Recherche du Centre d'Analyse Economique
Mars 2005

IRREVERSIBILITE MIXTE ET MODULARITE : UNE APPLICATION A L'INVESTISSEMENT ELECTRONUCLEAIRE

Karine Fiore

1. Introduction

Face à la croissance de la demande d'énergie dans le monde, à la rareté relative des ressources fossiles et devant les impératifs environnementaux imposés aujourd'hui par la communauté internationale, la question des choix énergétiques nationaux devient centrale. C'est dans ce contexte nouveau que le développement à grande échelle de l'énergie nucléaire se présente comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cependant, malgré les avantages indéniables de cette forme d'énergie, opter pour un programme d'investissement nucléaire n'est pas sans risque pour un pays. Ce type d'investissement requiert des ressources financières lourdes, un capital spécifique, un savoir-faire complexe et un planning décisionnel de long terme. S'engager dans cette voie industrielle comporte donc un fort degré d'irréversibilité, irréversibilité technique et financière, d'autant plus qu'elle est, malgré l'effort de recherche en la matière, encore empreinte d'incertitudes scientifique et technique. Choisir d'investir dans l'énergie nucléaire suppose donc pour un pays d'intégrer cette composante irréversible dans ses critères de décision.

Irréversibilité et incertitude sont en effet intimement liées. Toute décision n'est pas irréversible. Dans un contexte d'incertitude, cependant, certaines peuvent se révéler comme telles avec le temps au fur et à mesure que l'information progresse, amenant ainsi le décideur à regretter son choix initial. Dans la littérature économique, le critère de décision qui a longtemps prévalu est celui de la Valeur Actualisée Nette de l'analyse coûts-bénéfices néoclassique. Dans les années 1970, ce critère a été amendé par l'introduction du concept de valeur d'option [K. Arrow et A. Fisher, 1974 ; C. Henry, 1974]. Ce concept répond aux limites du critère standard dans le sens où il met en évidence la dynamique décisionnelle qui s'opère dans un contexte d'incertitude informationnelle. La valeur d'option s'inscrit dans un cadre décisionnel bien précis : elle intervient lorsque le décideur est confronté à une alternative entre une décision flexible et une décision irréversible au sein desquelles l'incertitude demeure. Cette incertitude n'est cependant pas irréductible et l'hypothèse centrale de notre cadre analytique est qu'il existe de réelles perspectives d'amélioration de l'information dans

le futur. Ainsi, une décision flexible est une décision dont les modalités permettent au décideur d'intégrer les informations nouvellement acquises dans le futur et de réviser son choix en fonction de celles-ci. *A contrario*, une décision irréversible est une décision qui condamne irrévocablement l'exploitation de toute l'information nouvelle et donc tout réajustement décisionnel dans le temps. Dans ce contexte, la valeur d'option se définit comme la valeur de l'information que permet d'exploiter une action flexible dans le futur. Elle exprime l'opportunité que ce type de décision offre au décideur de pouvoir réorienter ou réaffirmer son choix en fonction d'éléments informationnels nouveaux. La valeur d'option mesure donc la préférence pour la flexibilité du décideur et par là le degré d'irréversibilité plus ou moins important de chacune de ses décisions. Dans un contexte d'incertitude, elle se prononce donc clairement en faveur de la décision flexible. Une application de ce concept au choix d'investir ou non dans un programme nucléaire est donc adaptée compte tenu des caractéristiques de ce dernier. Cependant, s'ils prennent en compte l'irréversibilité que la décision initiale peut entraîner sur les opportunités de choix futurs, les modèles existants sont encore limités. En effet, nous nous accordons avec eux sur le fait que prendre une telle décision d'investissement, c'est engager de manière irrévocable de nombreux efforts et ressources. Investir est donc une décision irréversible. Reporter la décision pour exploiter l'information future est en revanche un choix favorable à la flexibilité décisionnelle. Néanmoins, ce que les modèles récents ne prennent pas en compte c'est qu'au-delà de la lourdeur des coûts de certains investissements, l'activité de production à laquelle ils correspondent peut comporter une multiplicité de risques de toute autre nature, et notamment des risques environnementaux et sanitaires. C'est tout particulièrement le cas de l'industrie nucléaire. Même s'ils n'en émanent pas directement, ces risques sont induits par la décision d'investir et sont également susceptibles de produire des effets d'irréversibilité à plus ou moins long terme en cas d'accident (dommages irréparables et pertes humaines). Ces effets d'irréversibilité sont des externalités intertemporelles et intradécisionnelles. Ainsi, lorsqu'on est confronté à ce type de choix, la décision originelle d'investir (décision irréversible) ne doit pas seulement prendre en compte la perte de flexibilité décisionnelle qui peut en émaner directement mais également tous les effets d'irréversibilité, même de nature différente, qui sont susceptibles d'intervenir à la suite de cette prise de décision. Nous faisons donc face à deux types d'irréversibilité : une irréversibilité technique et financière doublée d'une irréversibilité environnementale et sanitaire. Nous introduisons alors la notion d'*irréversibilité mixte*. Si la décision n'intègre pas cette double nature, le choix du décideur sera fondé sur un critère incomplet et biaisé en faveur de la décision irréversible. Il s'engagera alors dans une

voie source d'inefficacités. Puisqu'il s'agit ici de risques environnementaux et sanitaires, ce raisonnement équivaut à en internaliser les coûts *ex ante* de manière à optimiser la décision.

Dans le prolongement des travaux précurseurs, l'intérêt de ce travail est donc d'élargir l'analyse en terme de valeur d'option à une décision d'investissement soumis à une irréversibilité mixte. Ce faisant, nous étudions deux cas. Nous analysons tout d'abord le problème global du choix entre investir dans l'industrie nucléaire ou reporter la décision. Puis, nous complexifions le problème en introduisant une hypothèse supplémentaire : la modularité de l'investissement. Nous montrons ainsi qu'au sein même de la décision irréversible, un degré de flexibilité peut être conservé et nous en analysons les implications en termes décisionnels.

2. A la recherche du critère de choix optimal : de la VAN à la VOM

Conformément à l'analyse standard coûts-bénéfices, lorsqu'un investisseur doit faire un choix face à une alternative, il doit calculer la valeur actualisée nette (VAN) des bénéfices du projet. Dans le cas du choix entre produire de l'énergie nucléaire (construire une centrale) ou reporter la décision, le décideur doit alors calculer la somme actualisée des rendements de la centrale (bénéfices de la vente domestique et internationale d'électricité) à laquelle il doit ôter la somme actualisée des coûts de construction et de fonctionnement de celle-ci. Même s'il est incontestable que les coûts d'une centrale nucléaire sont très élevés, il n'en demeure pas moins que le chiffre d'affaire généré par cette activité de production est très important. Ainsi, à la lumière de ce calcul simple, l'investisseur prendra sa décision.

$$VAN = \text{Somme actualisée des rendements de la centrale} - \text{Somme actualisée des coûts de la centrale}$$

Comme cela a été démontré pour d'autres domaines d'application [R. McDonald et D. Siegel, 1986 ; R. Pindyck, 1991 ; X. Galiègue, 1996 ; A. Rauchs et M. Willinger, 1996], un tel calcul n'est pas adapté à une problématique décisionnelle comme la nôtre, qui se situe dans un cadre incertain et qui comporte un fort degré d'irréversibilité. Ici, l'incertitude porte sur l'évolution de la technologie nucléaire et sur certains coûts qui sont encore mal connus (coût de démantèlement, coûts de gestion des déchets sur le très long terme...). Aussi, un raisonnement à partir de la VAN du projet est-il inapproprié car il induit un biais en faveur de la décision irréversible. En effet, dans le cas où la VAN est positive, cette méthode d'arbitrage amènera de manière systématique le décideur à opter pour la décision irréversible en première

période, en l'occurrence construire la centrale ; et ceci, indépendamment de toute considération temporelle ou environnementale.

Un amendement au critère standard : la Valeur d'Option

C'est en comblant ces limites évidentes que les modèles de valeur d'option ont eu le succès qu'on leur connaît. Construire une centrale nucléaire comporte une grande part d'irréversibilité relative à ses coûts (coûts irrécupérables, amortissements sur le long terme ...) d'autant plus que la technologie nucléaire est encore imparfaite aujourd'hui. Malgré les efforts de recherche entrepris dans le monde depuis plus de cinquante ans, l'énergie nucléaire renferme encore des secrets quant à ses potentialités. Néanmoins, la recherche et le développement dans ce secteur sont très dynamiques¹ et on peut aisément supposer que dans le futur de nouvelles informations seront susceptibles d'être découvertes, clarifiant ainsi le cadre décisionnel de l'investisseur. Si ce dernier a une aversion pour le risque, il va préférer reporter sa décision d'investir dans une centrale et attendre que le progrès technique s'améliore en la matière pour pouvoir bénéficier des atouts du nucléaire tout en en minimisant les coûts². En revanche, s'il investit aujourd'hui, certes il poursuit une politique énergétique active tournée vers l'avenir³, mais il prend aussi le risque de s'engager dans une voie qu'il lui sera impossible d'abandonner ou de réorienter plus tard sans subir de lourdes pertes. Le fait qu'il soit confronté à un tel dilemme se traduit alors par une valeur d'option qui apparaît en faveur de la décision flexible. Le rôle de l'information est alors crucial : il permet la révision des choix intertemporels. En effet, si l'information évolue dans le futur, le décideur aura la possibilité de revoir ses choix et donc mieux à même de décider de manière optimale. Si, par exemple, le nouveau réacteur se révèle plus sûr pour l'environnement dans le futur, on peut

¹ En matière électronucléaire, les efforts de recherche sont multiples. Ils concernent la technologie de production, les procédés de stockage des déchets radioactifs, les techniques relatives à leur recyclage et toute amélioration technique relevant du domaine de la sûreté des installations. Pour ce qui est de ce travail, il se concentre sur les perspectives d'évolution de la technologie nucléaire c'est-à-dire du progrès technique relatif aux réacteurs.

² Dans la majorité des pays nucléarisés, les réacteurs couramment utilisés sont aujourd'hui des réacteurs REP (Réacteur à Eau Pressurisée) dits de "deuxième génération". Si le principe de fonctionnement est resté le même (la fission) entre les premiers réacteurs des années 1970-1980 et les derniers construits dans les années 1990, ils n'ont cessé d'évoluer rendant l'énergie nucléaire toujours plus performante et plus sûre. Depuis, les recherches se sont concentrées sur un réacteur de "troisième génération" (EPR, *European Pressurized water Reactor*) encore plus performant dont le premier exemplaire sera mis en service en Finlande en 2009. La quatrième génération, dont les premières applications industrielles pourraient intervenir à l'horizon 2040, est en cours d'étude. Enfin, le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) représente à lui seul une révolution technologique car il se base sur un procédé totalement novateur, la fusion. Sa construction devrait commencer en 2005 pour une période d'expérimentation d'au moins cinquante ans.

³ Il n'est plus à démontrer que l'énergie nucléaire présente d'indéniables atouts dont le plus important répond aux exigences de la Communauté Internationale, à savoir son inoffensivité vis-à-vis de l'effet de serre.

alors imaginer que le décideur, désormais plus confiant, s'engage dans l'investissement⁴. Cette possibilité qui lui est offerte d'actualiser en seconde période sa décision en fonction des informations nouvellement acquises a de la valeur pour lui. Cette valeur est la valeur de l'option "reporter la décision".

De manière formalisée, amender le critère de la Valeur Actualisée Nette de la décision d'investir par la Valeur d'Option revient à soustraire la seconde à la première.

$$\text{VAN amendée} = \text{Somme actualisée des rendements de la centrale} - \text{Somme actualisée des coûts de la centrale} \\ - \text{Valeur d'Option}$$

En effet, la valeur d'option est considérée comme un coût d'opportunité pour l'investisseur, coût dû à la renonciation à la flexibilité. Elle doit donc être ajoutée à la somme actualisée des coûts de la centrale. Concrètement, cette valeur représente les coûts que devrait supporter le décideur s'il investissait en première période mais qu'il peut éviter par l'adoption d'une position flexible. En l'occurrence, ces coûts sont, dans le cas qui nous occupe, les coûts de reconversion technique qu'il subirait pour mettre à jour sa technologie en seconde période ainsi que les coûts de gestion des déchets nucléaires qu'il aurait produits jusque là. Sans doute, ces coûts seraient tels que l'investisseur préférerait continuer à exploiter sa technologie en l'état, même si sa décision se révèle sous-optimale en $t + 1$, plutôt que de renouveler sa structure capitaliste à des coûts prohibitifs. La valeur d'option gonfle alors les coûts de la décision irréversible et fait donc naturellement pencher le choix de l'investisseur davantage vers le report.

L'analyse en terme de valeur d'option s'arrête traditionnellement à ce stade du raisonnement : la valeur d'option est défavorable à la décision irréversible, elle permet donc, en étant intégrée dans le calcul et en supposant que des gains d'information sont susceptibles d'apparaître dans le futur, d'éviter les écueils d'une prise de décision trop précoce. Mais, à notre sens, cette analyse est insuffisante et doit être élargie.

⁴ Il est à noter que nous considérons ici l'innovation comme exogène. En effet, si on considère que l'investisseur est également l'innovateur (dans la majorité des pays qui produisent du nucléaire, l'investisseur est public, et une grande part de la recherche en la matière l'est aussi), alors les efforts de R&D ne sont plus exogènes à son programme de décision. Le décideur ne fait donc plus face au choix entre investir ou attendre mais entre investir dans la centrale ou investir dans la recherche (et donc reporter). La R&D est un coût supplémentaire pour lui à intégrer dans son problème de décision. Le fait de financer la recherche en attendant qu'elle soit fructueuse pour investir, affaiblirait ainsi la valeur d'option du report de la décision car l'attente coûterait au décideur.

Une élargissement du critère à l'irréversibilité mixte

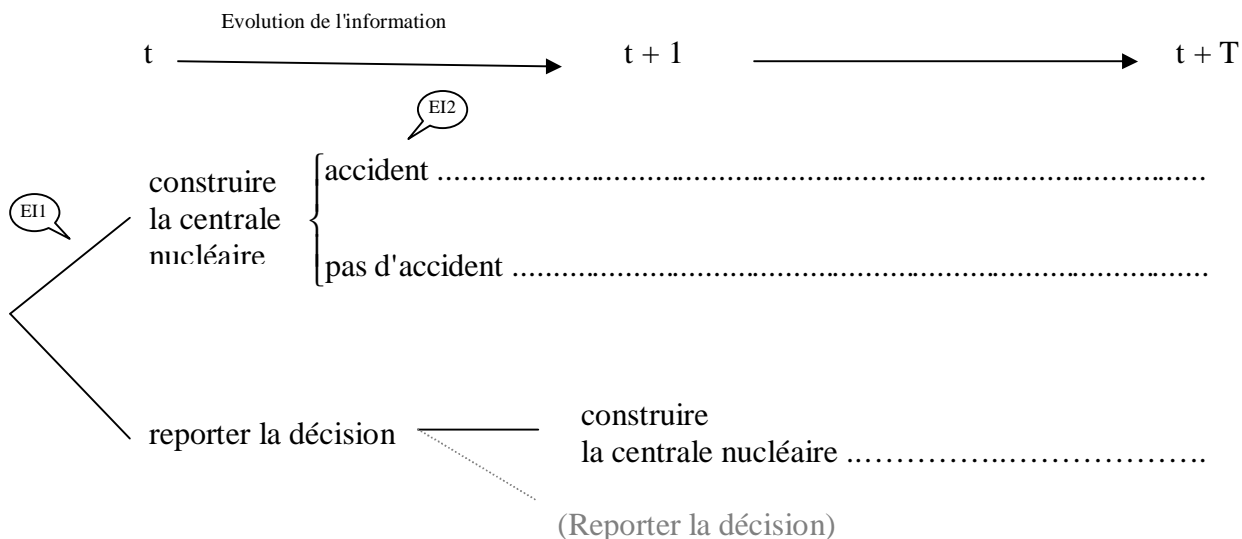
Nos sociétés font aujourd'hui face à de "nouveaux risques", des risques technologiques majeurs induits par un développement industriel de pointe dont la croissance a été exponentielle ces dernières années. Comme les industries chimiques ou encore d'autres secteurs énergétiques, l'industrie électronucléaire est soumise à de fortes contraintes relatives aux risques que son activité génère sur l'environnement et la santé. Investir dans ce type d'industrie suppose donc de prendre en compte le risque global d'investissement dans toutes ses dimensions, y compris les risques pouvant intervenir sur le long terme. Autrement dit, le décideur doit avoir conscience du fait qu'il va courir non seulement le risque d'irréversibilité financière et technique mais également le risque de devoir supporter les coûts matériels et humains provoqués par un éventuel accident nucléaire. Aussi, prendre une telle décision implique-t-il d'intégrer le caractère mixte de l'irréversibilité encourue dans la valeur d'option du programme de décision. Cependant, les modèles fondateurs ont concentré l'analyse de la valeur d'option sur le risque inhérent à la décision d'investissement en négligeant tous les aléas indirectement induits par elle. Or, si l'investisseur ne les intègre pas et qu'il base uniquement son calcul sur des considérations financières et techniques, il n'est pas garanti que le biais en faveur de la décision irréversible soit totalement éliminé. Il s'agit donc de réactualiser et d'ajuster le calcul en fonction des nouvelles contraintes. L'intégration de ces coûts dans la VAN amendée augmente la valeur d'option de la décision flexible dans le sens où si le progrès technique s'améliore dans le futur, et donc que l'information évolue, les coûts du risque nucléaire seront diminués (voire proches de zéro). Ainsi, si l'investisseur reporte sa décision en escomptant une telle avancée de la recherche et, si celle-ci aboutit effectivement, il économisera tout ou partie des coûts du risque. Nous introduisons alors une nouvelle valeur d'option que nous appelons *Valeur d'Option Mixte*.

$$\text{VAN amendée} = \text{Somme actualisée des rendements de la centrale} - \text{Somme actualisée des coûts de la centrale} \\ - \text{Valeur d'Option Mixte}$$

3. La structure du problème de décision

A la première période (t), le décideur fait donc face au choix suivant : construire immédiatement la centrale nucléaire ou reporter la décision à plus tard.

Nous pouvons représenter ce problème de décision sur l'arbre suivant :



Si l'investisseur construit la centrale en première période, et si le progrès technique a évolué positivement en $t + 1$, il est alors confronté à deux effets d'irréversibilité (EI). Le premier effet d'irréversibilité, noté EI1, est dû à l'inconvertibilité technique et aux pertes financières relatives au choix initial d'investir. Cet effet est celui que mesure traditionnellement la valeur d'option. Le second, noté EI2, est indirect et émane du risque environnemental et sanitaire que génère la technologie imparfaite dans laquelle le décideur a investi en t . Plus le décideur sera averse au risque, plus la prise en compte de ces effets dans le calcul qui déterminera son choix sera pertinente ; ceci d'autant plus que l'effet irréversibilité EI2 peut s'avérer très élevé, les coûts du risque nucléaire étant actuellement exorbitants. S'il reporte la décision, il peut bénéficier en $t + 1$ des nouvelles avancées scientifiques et éviter ainsi les effets EI1 et EI2. Bien entendu, le décideur doit alors engager d'importantes ressources financières pour investir dans le nouveau réacteur mais étant donné que sa décision est désormais optimale, le caractère irréversible que peuvent prendre ses dépenses ne risquera plus de l'amener à regretter sa décision⁵. Sa décision d'attendre était donc optimale et il profite désormais des bénéfices d'avoir favorisé le maximum de flexibilité dans son programme de décision. On peut évidemment imaginer que la recherche scientifique peine à fournir des résultats. Dans ce cas, si en $t + 1$ l'incertitude demeure, le décideur peut soit reporter de nouveau la décision à plus tard, le schéma décisionnel se répétant alors en $t + 2, t + 3, \dots, t + T$; Soit il peut renoncer définitivement à investir dans l'énergie nucléaire et s'orienter vers d'autres alternatives plus immédiatement accessibles et/ou moins risquées.

⁵ Dans ce cas, la décision d'investissement est ramenée à un cadre où l'incertitude n'est plus, donc les dépenses qui y sont relatives ne relèvent que de considérations de financement et de solvabilité de l'investisseur.

Les effets d'irréversibilité de la décision d'investir sont donc mesurés par ce que nous avons appelé la Valeur d'Option Mixte, notée VOM. Cette valeur a deux composantes :

(1) VO_1 mesure l'irréversibilité financière et technique. Elle est la valeur d'option traditionnelle. Elle représente les coûts que doit subir le décideur s'il a investi en t et qu'il évite par le report de la décision. Ces coûts comprennent les coûts de reconversion technique, notés C_r , et les coûts générés par la gestion des déchets nucléaires (coûts de confinement, stockage, recyclage...) qu'a engendrés sa technologie polluante jusqu'à sa reconversion en $t + 1$. Ces coûts sont notés $C_{d_{(t,t+1)}(t,T)}$. Cette notation appelle un commentaire. Si les déchets générés par l'ancien réacteur sont produits uniquement sur la période $(t, t + 1)$ comme indiqué en sous-indexe, il n'en demeure pas moins que l'investisseur devra prendre en charge leur gestion sur un terme beaucoup plus long, c'est-à-dire bien au-delà de $t + 1$ et même au-delà de l'arrêt de son exploitation comme le nécessitent certains déchets à vie longue ; soit sur la période (t, T) , T tendant vers l'infini⁶. Le nouveau réacteur, quant à lui, produit moins de déchets (voire aucun) et les coûts relatifs à leur gestion sont notés $C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)}$ et sont donc plus faibles (voire nuls). On a $C_{d_{(t,t+1)}(t,T)} > C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)}$, n pouvant être considérée par exemple comme la date d'arrêt de la centrale. Toutefois, si après l'apparition d'informations nouvelles l'investisseur décide de ne pas reconvertir son capital, faute de moyens financiers (ce qui est plus que probable), il se verra alors contraint de continuer à produire avec l'ancien réacteur. Ce réacteur polluant produira alors des déchets (plus nombreux) sur la période $(t, t + n)$. Les coûts de gestion de ces déchets persisteront également sur (t, T) et sont notés $C_{d_{(t,t+n)}(t,T)}$ et on a :

$C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)} < C_{d_{(t,t+1)}(t,T)} < C_{d_{(t,t+n)}(t,T)}$. Nous obtenons donc :

$$\begin{cases} VO_1 = C_r + C_{d_{(t,t+1)}(t,T)} - C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)} & \text{avec reconversion technique} \\ VO_1 = C_{d_{(t,t+n)}(t,T)} - C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)} & \text{sans reconversion technique} \end{cases}$$

Pour simplifier le problème et le rendre plus lisible au lecteur, nous émettons l'hypothèse que le nouveau réacteur nucléaire est totalement inoffensif vis-à-vis de l'environnement et donc qu'il ne produit aucun déchet.

⁶ Nous pouvons considérer à échelle humaine que T tend vers l'infini car les déchets à vie longue (comme le plutonium) sont radioactifs pendant des milliers, voire des centaines de milliers d'années. Aussi, leur gestion implique-t-elle, dans l'état actuel des technologies de stockage et de retraitement, un coût à supporter pendant de très longues périodes.

Ainsi, $C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)} = 0$ et l'expression de VO_1 précédente devient :

$$\begin{cases} VO_1 = C_r + C_{d_{(t,t+1)}(t,T)} & \text{avec reconversion technique} \\ VO_1 = C_{d_{(t,t+n)}(t,T)} & \text{sans reconversion technique} \end{cases}$$

(2) VO_2 mesure l'irréversibilité environnementale et sanitaire. Elle est la nouveauté du modèle. Elle représente les coûts des dommages matériels et humains que l'exploitant devra assumer en cas d'accident nucléaire⁷. Les coûts de ces risques ne sont qu'hypothétiques mais doivent néanmoins être intégrés dans le calcul de la VOM. VO_2 est la différence entre les coûts du risque nucléaire engendré par la technologie polluante (risques maximaux), notés C_a , et les coûts du risque engendré par le nouveau réacteur, notés $C_{a'}$ (risques minimaux). Puisque le nouveau réacteur est plus sûr et plus propre, les coûts $C_{a'}$ sont plus faibles que C_a . De plus, si le décideur voulait reconvertir sa technologie en $t + 1$, il devrait prendre en compte les coûts du risque nucléaire que son ancien réacteur aurait généré jusque là, soit $C_{a(t,t+1)}$, avec $C_{a'} < C_{a(t,t+1)} < C_a$. Nous avons donc :

$$\begin{array}{l} \text{avec reconversion technique} \\ \text{sans reconversion technique} \end{array} \begin{cases} VO_2 = C_{a(t,t+1)} - C_{a'} & \text{si } C_{a'} \neq 0 \\ VO_2 = C_{a(t,t+1)} & \text{si } C_{a'} = 0 \\ VO_2 = C_a - C_{a'} & \text{si } C_{a'} \neq 0 \\ VO_2 = C_a & \text{si } C_{a'} = 0 \end{cases}$$

Il est à noter que le cas de la reconversion technique n'a ici qu'une valeur indicative car étant donné l'importance des pertes qu'elle peut représenter après la mise en œuvre d'un investissement d'envergure massive, il est très improbable qu'elle soit réalisée. Ainsi, nous pouvons dès à présent, et pour la suite, émettre l'hypothèse que la reconversion technique est impossible dans ce cas.

⁷ Selon l'article 1, alinéa a) de la Convention de Paris, un accident nucléaire est défini comme "tout fait ou succession de faits de même origine ayant causé des dommages, dès lors que ce fait ou ces faits ou certains des dommages causés proviennent ou résultent soit des propriétés radioactives et des propriétés toxiques, explosives ou autres propriétés dangereuses des combustibles nucléaires ou produits ou déchets radioactifs, soit de rayonnements ionisants émis par une autre source quelconque de rayonnements se trouvant dans une installation nucléaire".

Ainsi, $VOM = VO_1 + VO_2$, avec $VO_1 > 0$ et $VO_2 > 0$. La positivité des VO_i ($i = 1,2$), est intuitive puisque si le décideur a intérêt à favoriser la flexibilité et donc à maintenir ouverte l'option d'investir, c'est qu'il y a un avantage à choisir cette position⁸.

La VOM est donc un critère complet. C'est seulement en prenant en compte toutes les composantes "à risque" de l'activité nucléaire, composantes intégrées dans ce critère, que l'investisseur nucléaire pourra optimiser sa décision.

4. La flexibilité dans l'irréversibilité : l'hypothèse de modularité

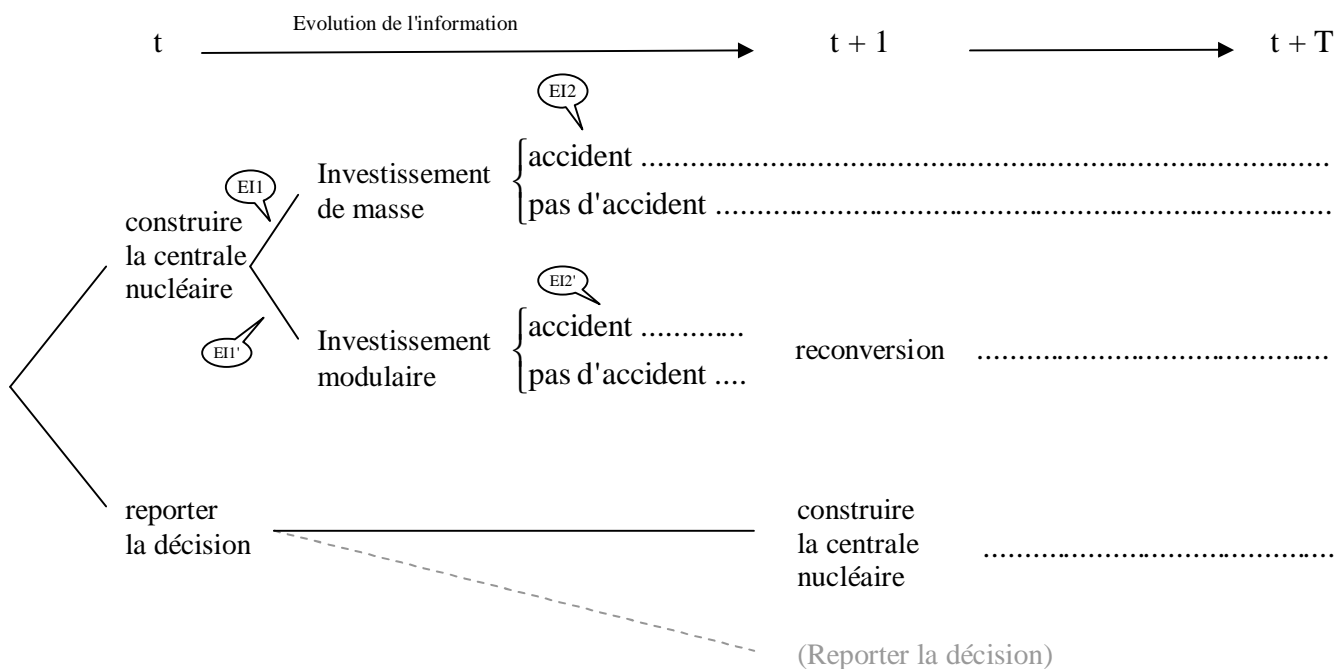
Pour complexifier le problème de décision et le rendre à la fois plus proche de la réalité, nous introduisons désormais une hypothèse nouvelle. Si le décideur choisit d'investir en t , il choisit certes la décision initiale la moins flexible. Mais supposons qu'en prenant cette décision, une alternative lui est proposée entre : construire la centrale nucléaire dans une structure modulaire ou investir en masse. Le problème décisionnel prend alors une autre dimension. L'investissement de masse vise une centrale de grande capacité dont la construction se fait "en bloc". Il s'agit d'une structure techniquement inamovible. Si l'investisseur choisit cette option, il agit comme en information parfaite et complète et il est certain qu'il sera dans l'impossibilité de reconvertir techniquement sa centrale si un nouveau réacteur émerge des avancées scientifiques. Ce cas se ramène au problème de décision étudié dans la section précédente. L'investissement modulaire, en revanche, a pour objet une centrale dont la structure est souple et modelable. Cette structure est flexible dans le sens où elle est décomposable [R.N. Langlois, 2000]. En effet, son assemblage et sa construction sont conçus de telle sorte qu'ils offrent la possibilité de changer un élément du tout (matériaux, composants, unités mécaniques...) sans pour autant changer le tout. Cette installation permet au décideur, si le progrès technique s'améliore dans le futur, d'être complétée et/ou reconvertie

⁸ Si la valeur d'option était négative, cela signifierait alors qu'il n'y a aucun avantage à attendre du futur des informations nouvelles. Cette situation concernerait le cas d'un investissement qui ne peut être reporté sans générer des coûts ou gâcher des manques à gagner. La valeur d'option peut s'avérer également nulle s'il n'y a pas ou plus d'incertitude relative à la décision. Par exemple, la valeur d'option peut être négative pour le projet d'un individu d'investir dans l'immobilier à un moment où les conditions sont très favorables (taux d'intérêt faibles, avantages fiscaux...). Si cet individu ne saisit pas l'opportunité, les conditions de marché risqueraient de changer en sa défaveur et l'attente n'aura alors été pour lui que pure perte. Le cas de la valeur d'option nulle, quant à lui, concerne un grand nombre de décisions. Par exemple, les décisions d'achats courants (biens primaires/secondaires...) ont une valeur d'option nulle, même s'ils impliquent des dépenses irréversibles, car reporter leur acquisition ne modifierait en rien le contenu informationnel de la décision.

à coût réduit⁹. Ainsi, la modularité introduit un certain degré de flexibilité dans la décision irréversible et garantit au décideur, bien que sa décision reste sous-optimale, une marge de manœuvre amplifiée. Cette opportunité est d'autant plus intéressante qu'elle est adaptée au processus actuel de dérégulation du marché électrique. En effet, dans ce contexte, la préférence pour la flexibilité des investissements devient une priorité pour garantir la souplesse nécessaire à la variabilité des conditions de marché [R.N. Langlois, 2000 ; C. Gollier et al. 2004]. Opter pour la modularité permettrait alors au décideur de corriger les effets d'irréversibilité engendrés par la précocité de sa décision.

Toutefois, les centrales nucléaires modulaires sont souvent de plus petite capacité que les centrales issues d'un investissement de masse. Par le jeu de l'effet-taille¹⁰, les rendements en sont donc inférieurs. Ainsi, si la modularité offre un degré supplémentaire de flexibilité décisionnelle au décideur par rapport à l'investissement de masse, on peut néanmoins se demander dans quelle mesure elle aura sa préférence¹¹.

L'arbre de ce nouveau problème de décision devient :



⁹ Cette possibilité est principalement envisageable pour l'acquisition future d'un réacteur de troisième ou de quatrième génération, tout deux basés sur le même procédé productif que le réacteur actuellement utilisé, celui de la fission. En effet, il semble plus difficilement concevable, en particulier techniquement, qu'une structure modulaire aujourd'hui adaptée à un réacteur de fission puisse être reconvertie en une structure pouvant accueillir un réacteur de fusion. Aussi, le projet de réacteur ITER est-il à écarter de ce second modèle de décision.

¹⁰ L'effet-taille est relatif à la loi des rendements d'échelle croissants. En effet, il suppose que plus une centrale de production est de grande taille, plus ses rendements d'échelle sont importants.

¹¹ De plus, l'investissement de masse peut présenter l'avantage de permettre à celui qui le réalise d'être le premier sur le marché et donc d'imposer ses standards aux nouveaux entrants. Il est à noter que nous évacuons ce type de raisonnement de notre analyse car il relève de considérations stratégiques susceptibles de parasiter notre propos.

De nouveau, dans cet exemple, il est évident que dans une perspective d'informations nouvelles, l'investisseur a intérêt à reporter la décision. Néanmoins, s'il construit la centrale en première période, il a malgré tout la possibilité de conserver une certaine marge d'action. En effet, s'il opte pour un investissement de grande capacité, sa décision est définitivement irrévocable. La reconversion technique est financièrement insoutenable en $t + 1$ et les risques environnementaux et sanitaire maximaux. Dans cette chaîne de décisions, l'irréversibilité est donc à son plus haut degré et la décision ne pourra jamais être révisée. On retrouve ici les mêmes effets d'irréversibilité EI1 et EI2 que dans le problème de décision précédent. En revanche, si l'investissement modulaire est mis en œuvre, même si c'est de manière prématurée, il laisse une part de flexibilité décisionnelle quant à la possibilité d'exploiter une information nouvelle. C'est un moyen pour le décideur d'agir immédiatement mais de manière précautionneuse. Ainsi, il pourra, le moment opportun, reconvertir au moins partiellement son capital productif en y intégrant l'innovation. Il va sans dire que cette restructuration technique impliquera un coût non négligeable mais plus accessible que si l'investissement de masse avait été réalisé. L'effet d'irréversibilité technique et financière demeure donc ici mais est amoindri par rapport à EI1. On le note EI1' et on a $EI1' < EI1$. Il en est de même pour l'effet d'irréversibilité EI2 puisque la reconversion intègre les nouvelles performances environnementales du dernier réacteur. On note ce nouvel effet d'irréversibilité EI2' et on a donc $EI2' < EI2$ ¹².

A ce stade de l'analyse, le calcul de la Valeur d'Option Mixte correspondant à ce nouveau problème de décision est intéressant.

4.1. La Valeur d'Option Mixte du report de la décision

Comme VOM, la nouvelle Valeur d'Option Mixte, notée VOM', est composée de deux éléments :

(1) VO'_1 représente la valeur d'option traditionnelle qui mesure l'irréversibilité financière et technique relative à la décision d'investir. Elle est égale à VO_1 si l'investissement de masse est mis en œuvre. Si l'investissement est modulaire, les coûts de reconversion du capital (qui sont alors plus abordables que dans le cas de l'investissement de masse) sont notés C'_r avec $C'_r < C_r$. Avant que l'investisseur ne réorganise son capital, il a produit avec la

¹² On peut envisager le cas où l'investissement modulaire a un coût initial supérieur à l'investissement de masse (ingénierie plus complexe, matériaux plus sophistiqués...). On se demande alors dans quelle mesure la diminution des effets d'irréversibilité par la modularité compense le différentiel de coût d'investissement initial. S'il s'avère que cette compensation n'est pas suffisante, le décideur peut préférer reporter son investissement malgré l'existence de l'option modulaire.

technologie polluante. On intègre donc, comme précédemment, les coûts de gestion des déchets nucléaires générés de t à $t + 1$ et supportés sur la période (t, T) ; coûts que l'on note $C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)}$. Nous rappelons que nous avons supposé que le nouveau réacteur ne produisait aucun déchet donc que $C_{d_{(t+1,t+n)}(t,T)} = 0$. La valeur d'option VO'_1 est donc égale à :

$$\begin{cases} VO'_1 = VO_1 & \text{si investissement de masse} \\ VO'_1 = C'_r + C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)} & \text{si investissement modulaire} \end{cases}$$

(2) VO'_2 mesure l'irréversibilité environnementale et sanitaire relative à l'investissement en t . Comme VO_2 , elle représente les coûts du risque nucléaire évités par le report de la décision. Si on note C_{am} les coûts du risque nucléaire engendré par la centrale modulaire, VO'_2 est alors égale à :

$$\begin{cases} \text{si investissement de masse} & VO'_2 = VO_2 \\ \text{si investissement modulaire} & \begin{cases} VO'_2 = C_{am} - C_{a'} & \text{si } C_{a'} \neq 0 (C_{am} > C_{a'}) \\ VO'_2 = C_{am} & \text{si } C_{a'} = 0 \end{cases} \end{cases}$$

Nous rappelons que $C_{a'}$ représente les coûts du risque nucléaire engendré par le nouveau réacteur. La nouvelle Valeur d'Option Mixte est alors égale à : $VOM' = VO'_1 + VO'_2 > 0$. Pour les mêmes raisons invoquées dans le problème de décision précédent, les valeurs d'option VO'_1 et VO'_2 sont toute deux positives. Etant donné les données du problème, l'investisseur a donc de nouveau intérêt à reporter sa décision.

4.2. La Valeur d'Option Mixte de la modularité

Nous venons de calculer la VOM de ce nouveau problème de décision. Cette VOM correspond à la valeur que présente la décision de reporter l'investissement sur celle d'investir dès aujourd'hui. Or, l'un des intérêts de cette section est de montrer que dans une décision irréversible, un certain degré de flexibilité peut subsister, complexifiant ainsi le choix. Etant donné que c'est la modularité qui introduit cette propriété dans la décision irréversible, elle implique donc, au même titre que le report, une valeur d'option. On note cette valeur d'option de l'investissement modulaire VOM_m . Cette valeur représente, au sein même de la décision

d'investir, les avantages que procure la préférence pour la modularité par rapport à l'investissement de masse. Comme VOM et VOM', la valeur VOM_m se décompose en une mesure de l'irréversibilité financière et technique et une mesure de l'irréversibilité environnementale et sanitaire, notées respectivement VO_{m1} et VO_{m2} . De plus, étant donné que la centrale modulaire est de taille plus petite que la centrale issue de l'investissement de masse, elle produit moins de déchets. On a $C_{d(t,T)} - C'_{d(t,t+1)(t,T)} > 0$. De ce fait, les coûts du risque nucléaire en sont amoindris et on a $C_a > C_{am}$; C_a représentant les coûts du risque nucléaire généré par la centrale de grande capacité. Même si nous avons précédemment convenu du fait que la reconversion technique était impossible dans le cas de l'investissement de masse, nous faisons apparaître ici le différentiel de coûts de reconversion en faveur de l'installation modulaire car il représente un atout pour l'investisseur qui choisit cette option. En reprenant les notations précédemment utilisées, nous obtenons donc le résultat suivant :

$$\begin{cases} VO_{m1} = (C_r - C'_r) + (C_{d(t,T)} - C'_{d(t,t+1)(t,T)}) \\ VO_{m2} = C_a - C_{am} \end{cases}$$

$$\text{soit : } VOM_m = VO_{m1} + VO_{m2} - \varepsilon > 0$$

Cette équation appelle une remarque. Nous avons vu que la centrale modulaire était de capacité moindre par rapport à la centrale issue de l'investissement de masse et qu'elle était donc moins rentable. On peut alors soulever la question des conséquences qu'a sur sa valeur d'option le différentiel de rentabilité qu'il existe en défaveur de la centrale modulaire. En effet, cette perte de rentabilité fait diminuer la Valeur d'Option Mixte de la modularité puisqu'elle s'exprime en faveur de l'investissement de masse. Cependant, il est raisonnablement envisageable que ce manque à gagner soit plus que compensé par le gain que rapporte au décideur le choix de la modularité en terme de diminution des coûts de reconversion technique ($C_r - C'_r$), des coûts du risque nucléaire ($C_a - C_{am}$) et de quantité de déchets produits ($C_{d(t,T)} - C'_{d(t,t+1)(t,T)}$). En effet, les coûts du risque nucléaire C_a sont exorbitants¹³ et le différentiel mesuré par VO_{m2} par conséquent très grand. Il en est de même pour la différence ($C_{d(t,T)} - C'_{d(t,t+1)(t,T)}$) puisque les coûts $C_{d(t,T)}$ de gestion des déchets nucléaires (déchets produits en quantité non négligeable, à l'heure actuelle environ 1200 tonnes/an en France dont

¹³ Selon différentes études, le coût moyen d'un accident nucléaire se situerait entre 15 et 22 milliards € [S. Lonergan, R. Gobel et C. Cocoraton, 1990]. D'autres études s'accordent sur ce point : Rapport Sandia, 1982; N. Evans et C. Hope, 1984; V. Haynes et B. Bojcun, 1988. Ainsi, les coûts de reconversion technique seront certainement inférieurs aux coûts du risque.

800 tonnes recyclées), sont très lourds (coûts de très long terme, normes de sécurité draconiennes...). La valeur d'option VOM_m reste donc positive mais par souci de rigueur, nous intégrons le défaut de rentabilité de l'investissement modulaire dans le calcul ; défaut représenté par ε , $\varepsilon > 0$.

Ainsi, nous pouvons conclure de ce second modèle qu'en dépit de rendements inférieurs, la solution modulaire sera préférée par le décideur à l'investissement de masse. Cette option conserve une sous-optimalité car elle est génératrice de coûts qui peuvent être évités par le report de la décision mais elle reste préférable à la décision totalement irrévocable impliquant les effets d'irréversibilité EI1 et EI2. Elle incarne donc une solution de second rang.

5. Les résultats du modèle de Valeur d'Option Mixte

5.1. L'effet de la modularité sur la VOM

Pour mettre en évidence l'effet de l'introduction de la modularité dans le problème de décision présenté dans la section 4, il faut comparer les Valeurs d'Option Mixtes correspondant aux deux problèmes. Autrement dit, il faut calculer la différence entre VOM et VOM'. Pour ce faire, nous émettons l'hypothèse que les ambitions scientifiques ont été pleinement atteintes et que le nouveau réacteur nucléaire est inoffensif vis-à-vis de l'environnement, soit que $C_a = 0$, et nous maintenons que la reconversion technique est impossible à réaliser après l'investissement de masse. Nous rappelons alors que :

- $VOM = C_{d(t,T)} + C_a$

Pour les différentes raisons invoquées dans le paragraphe 4.2., on sait que $C_{d(t,T)}$ et C_a , et par conséquent VOM, sont très élevés.

- $VOM' = VOM = C_{d(t,T)} + C_a$ si investissement de masse

- $VOM' = C'_r + C'_{d_{(t+1)}(t,T)} + C_{am}$ si investissement modulaire

Ici, VOM' n'est modifiée que dans le cas de la modularité. On sait que $C_{d(t,T)} > C'_{d_{(t+1)}(t,T)}$ et que $C_a > C_{am}$. On a donc $C_{d(t,T)} + C_a > C'_{d_{(t+1)}(t,T)} + C_{am}$ soit $C_{d(t,T)} - C'_{d_{(t+1)}(t,T)} + C_a - C_{am} > 0$.

Reste donc à connaître le signe de $VOM - VOM'$, soit de :

$$VOM - VOM' = [C_{d(t,T)} + C_a] - [C'_r + C'_{d(t+1)(t,T)} + C_{am}]$$

$$VOM - VOM' = [C_{d(t,T)} - C'_{d(t+1)(t,T)} + C_a - C_{am}] - C'_r$$

Cette différence sera positive pour $[C_{d(t,T)} - C'_{d(t+1)(t,T)} + C_a - C_{am}] > C'_r$. Sans données numériques, il nous est mathématiquement impossible de conclure. Néanmoins, nous pouvons présumer que cette différence sera positive. En effet, investir en masse aujourd'hui engendre des effets d'irréversibilité cumulatifs et de grande ampleur. La modularité permet de corriger fortement ces effets à la baisse et, même si elle implique une charge financière pour la reconversion technique (C'_r), il semble tout à fait raisonnable de penser que celle-ci restera largement inférieure aux coûts, excessifs nous l'avons vu, qu'impose l'installation inamovible ($C_{d(t,T)}$ et C_a). De surcroît, la charge C'_r est un coût fixe et unique tandis que $C_{d(t,T)}$ et C_a sont des coûts croissants et perpétuels.

Ainsi, la positivité de la différence entre VOM et VOM' montre que l'introduction d'un degré, même faible, de flexibilité dans la décision irréversible, affaiblit la valeur d'option du report de la décision ($VOM > VOM'$). En effet, à partir du moment où le décideur a l'opportunité de revenir, au moins en partie, sur sa décision en $t + 1$ grâce à la modularité, il sera moins réticent à s'engager dans l'investissement dès la première période.

5.2. L'effet de l'irréversibilité mixte sur la valeur d'option

La prise en compte de l'irréversibilité environnementale et sanitaire que peuvent engendrer des investissements tels que l'investissement électronucléaire permet de placer la préférence pour la flexibilité au centre du processus de décision. L'étude des deux problèmes de décision précédents nous permet de conclure en ce sens. Contrairement au paragraphe précédent, il ne s'agit pas ici de comparer la Valeur d'Option Mixte de chaque problème l'une avec l'autre mais de comparer les Valeurs d'Option Mixtes de chaque problème avec les valeurs d'option traditionnelles qui leur correspondent. En d'autres termes, nous pouvons corroborer notre argument en étudiant la position relative des valeurs VO_1 , VO'_1 et VO_{m1} vis-à-vis respectivement de VOM , VOM' et VOM_m . Ce faisant, nous pouvons répondre aux deux questions suivantes.

(1) Quel effet l'introduction de la mixité de l'irréversibilité a-t-elle eu sur la valeur d'option du report de la décision ?

Nous rappelons que :

- $VOM = C_{d(t,T)} + C_a$
- $VO_1 = C_{d(t,T)}$

Comparer VOM et VO_1 revient à comparer la valeur du report de la décision d'investir dans les cas où on prend (VOM) ou non (VO_1) en compte l'irréversibilité environnementale. Ainsi, on démontre facilement que la différence $VOM - VO_1 = C_{d(t,T)} + C_a - C_{d(t,T)}$ est positive. Ceci confirme notre intuition de départ que l'internalisation *ex ante* des coûts du risque nucléaire dans le critère de décision est pertinente pour l'investisseur. En effet, la différence entre les deux valeurs d'option est égale à $VO_2 = C_a$, soit le supplément de coût relatif à la prise en compte de l'irréversibilité environnementale.

Cette conclusion se confirme pour la différence $VOM' - VO'_1$. Comparer VOM' et VO'_1 dans le cas de l'investissement de masse revient au cas précédent. En revanche, pour l'investissement modulaire, nous avons :

- $VOM' = C'_r + C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)} + C_{am}$
- $VO'_1 = C'_r + C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)}$

On obtient $VOM' - VO'_1 = [C'_r + C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)} + C_{am}] - [C'_r + C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)}] = C_{am} = VO'_2 > 0$.

Nous constatons donc pour les deux problèmes de décision une hausse de la valeur d'option du report de la décision. Cela signifie que l'introduction de la mixité de l'irréversibilité dans la valeur d'option à travers la VOM alourdit davantage les contraintes qui pèsent sur la décision irréversible d'investir et fait pencher le décideur vers l'attente avec encore plus de poids.

(2) quel effet l'introduction de la mixité de l'irréversibilité a-t-elle eu sur la valeur d'option de la modularité ?

Il s'agit ici de comparer la Valeur d'Option Mixte de la modularité VOM_m , calculée dans la section 4, et la valeur d'option traditionnelle VO_{m1} . Nous avons :

- $VO_{m1} = (C_r - C'_r) + (C_{d(t,T)} - C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)})$
- $VOM_m = (C_r - C'_r) + (C_{d(t,T)} - C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)}) + (C_a - C_{am}) - \varepsilon > 0$

On obtient alors :

$$VOM_m - VO_{m1} = (C_r - C'_r) + (C_{d(t,T)} - C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)}) + (C_a - C_{am}) - \varepsilon - (C_r - C'_r) - (C_{d(t,T)} - C'_{d_{(t,t+1)}(t,T)})$$

soit $VOM_m - VO_{m1} = C_a - C_{am} - \varepsilon = VO_{m2} - \varepsilon > 0$.

Comme nous l'avons supposé dans la section précédente, le manque à gagner ε de la modularité est plus que compensé par le gain que rapporte au décideur le choix de la modularité en terme de diminution des coûts de reconversion technique, des coûts de gestion des déchets produits et tout particulièrement des coûts du risque nucléaire. On a donc $VO_{m2} > \varepsilon$.

Conformément aux résultats précédents, l'intégration de l'irréversibilité mixte dans la valeur d'option de la modularité se prononce donc clairement en défaveur de l'investissement de masse.

En somme, l'introduction de l'irréversibilité environnementale et sanitaire dans les modèles traditionnels de valeur d'option a eu pour effet d'amplifier la préférence du décideur pour la flexibilité décisionnelle, et en particulier pour la solution modulaire.

6. Conclusion

Les modèles traditionnels de valeur d'option sont limités pour traiter des investissements dans des activités générant des risques environnementaux et sanitaires. Ils fautent par le fait qu'ils n'intègrent pas les coûts de ces risques. L'introduction de la mixité de l'irréversibilité augmente les valeurs d'option traditionnelles en même temps qu'elle affaiblit leur pertinence au profit des Valeurs d'Option Mixtes. Prendre en compte les "nouveaux risques" que certaines activités productives génèrent sur l'environnement et la santé réduit donc considérablement l'attractivité des investissements en la matière ; investissements pour la plupart irréversibles. Seule l'existence d'un degré, même faible, de flexibilité dans la décision d'investir, comme la modularité dans notre modèle, permet de réduire cette aversion.

Notre modèle de Valeur d'Option Mixte a pour objet de définir un cadre général d'analyse pour les décisions d'investissement à irréversibilité mixte et incertaine. Il s'articule autour de l'idée selon laquelle l'investisseur doit, avant de décider, intégrer *ex ante* la totalité des coûts qui sont relatifs à son projet d'investissement. Dans le cas de l'investissement nucléaire, ces coûts sont nombreux et multidimensionnels. Ils sont même, pour certains d'entre eux, difficilement appréciables. Aussi, si notre travail a pour objectif de proposer la structure d'un modèle théorique de décision, il débouche, quant à ses applications concrètes, sur un problème d'évaluation. Les coûts relatifs à l'investissement nucléaire sont de plusieurs types et relèvent de méthodes de calcul hétérogènes. On peut distinguer trois catégories de

coûts : les dépenses directement induites par l'investissement, les coûts de gestion des déchets générés par l'activité de production et les coûts du risque nucléaire.

Les premiers coûts, relatifs à la construction et au fonctionnement de la centrale nucléaire, sont relativement faciles à calculer. L'expérience et l'observation sont les principales bases de calcul. De nombreuses études existent en la matière et les opérateurs nucléaires ont aujourd'hui suffisamment de recul pour connaître l'ampleur et la variabilité de ces coûts. Néanmoins, la durée de vie d'une centrale est limitée (environ 35 ans) et ces mêmes opérateurs peinent encore à estimer avec exactitude les coûts de démantèlement d'une telle structure.

Les coûts de gestion des déchets produits par l'activité électronucléaire, quant à eux, sont plus délicats à évaluer. Selon la nomenclature européenne, il existe quatre catégories de déchets nucléaires¹⁴ ; chaque catégorie faisant l'objet d'un traitement spécifique. Les coûts relatifs à leur gestion comprennent les coûts d'entreposage, de transport, de refroidissement, de recyclage, de confinement et de stockage. Ils sont très élevés et certains relèvent même du très long terme. Ceux-là ne sont alors évaluables que par conjecture et on ne peut prédire leur évolution¹⁵.

Enfin, les coûts du risque nucléaire sont les plus complexes à chiffrer. Ils concernent les dommages matériels et humains qui peuvent être causés par un accident nucléaire. Ces coûts ne sont qu'hypothétiques puisqu'ils sont engendrés par un évènement dont on ne connaît pas la probabilité de survenance. Ils ne sont donc pas observables et doivent faire l'objet d'une évaluation *ex ante*. L'objet de cet article n'était pas de définir une méthode de calcul pour ces coûts. Cependant, les intégrer dans la valeur d'option suppose de les avoir estimés au préalable. Les coûts du risque nucléaire sont de trois sortes. Ils concernent tout d'abord les dégâts matériels que peut provoquer un accident. Ces coûts sont évaluables sans trop de difficulté selon l'ampleur de l'accident. En revanche, les coûts environnementaux et humains ne sont pas aussi aisément appréciables. Les premiers sont en effet encore difficilement prévisibles bien que les effets de la radioactivité sur l'écosystème soient aujourd'hui relativement bien connus. En ce qui concerne les coûts humains, ils sont d'ordinaire évalués selon le critère de la valeur de la vie humaine [L.I. Dublin and A.J. Lotka, 1946]. Ce critère présente des limites méthodologiques et éthiques. En effet, les montants

¹⁴ Les déchets se différencient selon leur durée de vie et leur niveau de radioactivité. On distingue les déchets de très faible activité (TFA), de faible activité (FA), moyenne activité à vie courte ou longue (MAVC/MAVL) et enfin de haute activité (HA).

¹⁵ Les résultats des recherches dictées par la loi Bataille du 30 décembre 1991 se prononceront en France en 2006 sur les nouvelles voies technologiques à emprunter dans le futur pour la gestion des déchets nucléaires. Les choix en la matière influenceront sans aucun doute l'évolution des coûts de cette gestion.

d'indemnisation sont établis dans le cadre du régime de responsabilité civile nucléaire. Ils sont déterminés en fonction de la solvabilité de l'exploitant nucléaire et de la valeur de la vie humaine. Cela suppose-t-il que la vie humaine est évaluée *ex ante*? Si l'évaluation des préjudices humains est effectuée *ex post*, c'est-à-dire après l'accident, elle relève de l'indemnisation. Elle concerne la responsabilité civile donc le droit et non le marché. En revanche, si l'évaluation est réalisée *ex ante*, il s'agit dans ce cas d'une valeur actualisée, autrement dit, d'un prix. Ceci pose donc le problème de l'évaluation de la vie humaine comme un prix. Dans le cas de l'industrie électronucléaire, c'est le législateur qui fixe les montants d'indemnisation. Dans quelle mesure a-t-il le pouvoir d'apprécier la valeur de la vie humaine ? Par quelle procédure va-t-il sélectionner les critères à intégrer dans une telle estimation ? Si on considère que la vie humaine n'est pas "prisable" *ex ante*, en tout cas pas de manière moralement acceptable et économiquement juste, alors on est face à une indétermination concernant les coûts des dommages humains susceptibles d'être générés par un accident nucléaire. De ce fait, lorsque l'investisseur veut intégrer ces coûts dans les coûts du risque nucléaire pour évaluer la Valeur d'Option Mixte de sa décision, il est confronté à une inconnue. De surcroît, si la valeur de la vie humaine est indéterminée, cela revient à supposer qu'elle peut prendre des valeurs très grandes et la Valeur d'Option Mixte tend alors vers l'infini. Ramené à notre problème de décision, cet argument se prononce clairement en défaveur de l'investissement nucléaire puisqu'il signifie que le report sera toujours la décision optimale et que l'investisseur ne s'engagera donc jamais dans un programme nucléaire.

Nous n'avions pas comme objectif de traiter ici ces problèmes d'évaluation, mais simplement la volonté d'y faire allusion. Ils sont très complexes et mériteraient que nous leur consacrons un article.

Références bibliographiques

Arrow, K., and Fisher A. [1974], "Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility", *Quarterly journal of economics*, 88, pp 312-319.

Bourdieu, J., Coeuré B. et Sédillot B. [1997], "Investissement, incertitude et irréversibilité. Quelques développements récents de la théorie de l'investissement ", *Revue économique*, 48(1).

Cohendet, P., et Llerena P. [1989], *Flexibilité, information et décision*, Economica

Decaestecker, J-P., et Rotillon G. [1990], "Acquisition d'information, innovations et irréversibilités", *Revue économique*, 2, pp 411-431.

Denant-Boémont, L., et Hammiche S. [2000], "Gains d'information du décideur public et valeur d'option des grands projets d'infrastructure", *Economie et prévision*, 143/144, pp 139-153.

Dixit, A.K., and Pindyck R.S. [1994] , *Investment under uncertainty*, Princeton.

Dublin, L.I., and Lotka A.J. [1946], *The money value of a man (Public Health Series in America)*, Ronald Press, New York.

Eeckhoudt, L. [1995], *Risk: evaluation, management and sharing*, Harvester Wheatsheaf.

Evans, N., and Hope C. [1984], *Nuclear power: future, costs and benefits*, Cambridge, Cambridge University Press.

Galiègue, X. [1996], "Irréversibilité de l'investissement et valeur d'option", *Revue d'économie politique*, 106, pp 843-863.

Gollier, C., Prout D., Thais F. And Walgenwitz G. [2004], "Choice of nuclear power investments under price uncertainty : valuing modularity", World Energy Congress, Sydney, Australia.

Haynes V. & Bojcun B. [1988], *The Tsjernobyl disaster*, London, Hogarth Press

Henry, C. [1974], "Investment decisions under uncertainty : the "irreversibility" effect", *The American Economic Review*, 64 (6), pp 1006-1012.

Krutilla, J. V. [1967], "Conservation reconsidered", *The American Economic Review*, 57, pp 777-786.

Langlois, R.N. [2000], "Modularity in technology and organization", *Journal of Economic Behavior and Organization*, 49, pp 19-37.

Laffont, J-J., and Freixas X. [1982], "On the irreversibility effect", *Bayesian Economics*, R. Kihlstrom et M. Boyer ed..

Laufer, R. [1993], *L'entreprise face aux risques majeurs*, L'Harmattan.

Le Dars, A., et Schneider T. [2002], *L'évaluation des coûts externes à long terme de la filière nucléaire: intérêts et limites*, Rapport du Centre d'Etude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), n°274.

Lonergan, S., Gobel R. and Cororaton C. [1990], "Estimating the financial consequences of a severe nuclear accident in Canada", *Energy*, 15(6), pp 507-522.

Martin, F. [2003], "La vie humaine a-t-elle une valeur économique?", Mimeo, Université de Montréal, Québec.

McDonald, R., and Siegel D. [1986], "The value of waiting to invest", *Quarterly journal of Economics*, 101, pp 707-728.

Pindyck, R. [1991], "Irreversibility, uncertainty, and investment", *Journal of Economic Literature*, 29, pp 1110-1148.

Rauchs, A. et Willinger M. [1996], "Expérimentation sur les choix séquentiels. Application à l'effet irréversibilité", *Revue Economique*, 47 (1), pp 51-71.

Richard, A. [1982], "Eléments de synthèse entre valeur actualisée et délai de récupération : "l'effet irréversibilité"", *Revue d'économie politique*, 1, pp 1-15.

Roberts, K., and M. Weitzman [1981], "Funding Criteria for Research, Development and Exploration Options", *Econometrica*, 49, pp 1261-1288.

Smith, V.K. [1983], "Option Value: a conceptual overview", *Southern Economic Journal*, 23 (July), pp 149-73.

Treich, N. [2000], "Décision séquentielle et principe de précaution", *Cahiers d'économie et de sociologie rurales*, 55/56, pp 5-24.