



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU RISQUE NUCLEAIRE

Pierre PICARD

Cahier n° 2014-26

DEPARTEMENT D'ÉCONOMIE

Route de Saclay

91128 PALAISEAU CEDEX

(33) 1 69333033

<http://www.economie.polytechnique.edu/>

<mailto:chantal.poujouly@polytechnique.edu>

L'évaluation économique du risque nucléaire.*

Pierre Picard (Ecole Polytechnique)

10 juillet 2013

*Ce rapport a été rédigé pour l'Autorité de Sûreté Nucléaire française (ASN) en vue d'éclairer la réflexion sur l'analyse économique du risque d'accident nucléaire. Cependant, il n'engage que son auteur et il ne reflète pas nécessairement les positions de l'ASN.

1 Résumé

La production d'électricité au moyen de l'énergie nucléaire est une activité dont on ne peut ignorer les risques et elle doit faire l'objet d'un calcul économique approprié. Les spécificités du risque nucléaire justifient que le décideur public incorpore une valorisation adéquate de ces risques dans la balance des coûts et des bénéfices : il s'agit d'un risque qui n'est que partiellement mutualisable, qui a une dimension systémique, dont les aléas sous-jacents sont imparfaitement probabilisables, et qui peut conduire à des conséquences de nature catastrophique sur le très long terme. Ces différentes caractéristiques donnent au risque nucléaire une dimension spécifique qui l'éloigne des principes usuels du calcul économique public et chacune d'entre-elles justifie une valorisation spécifique de ce risque dont la probabilité est faible ou très faible, mais dont les conséquences potentielles sont de très forte intensité.

La théorie microéconomique des choix dans l'incertain donne des éléments pour apprécier les déterminants principaux de cette valorisation économique du risque nucléaire. Ceux-ci sont liés à l'aversion pour le risque des individus, à l'ampleur des effets macroéconomique d'un accident nucléaire, à l'ambiguïté du risque du fait des incertitudes sur la probabilité d'accident, au coût financier du transfert de risques financiers de grande taille, aux objectifs d'équité intergénérationnelle et aux caractéristiques et incertitudes qui affectent la croissance économique future.

Par delà les déterminants théoriques du coût économique du risque nucléaire, se pose la question plus concrète de la manière dont ce coût pourrait être internalisé dans le calcul économique. La dimension systémique du risque nucléaire invite à faire une analogie avec la régulation du risque financier systémique qui est au coeur de la réforme de la régulation bancaire internationale actuellement en cours. Si le risque financier systémique renvoie à un mécanisme de déclenchement propre aux banques et aux marchés financiers (les crises de liquidité et la propagation des défaillances bancaires en chaîne) tandis que nous parlons ici de catastrophes technologiques, il n'en reste pas moins vrai que les crises bancaires majeures (comme celles des années 1930 ou la crise actuelle) et les catastrophes nucléaires (comme celles de Chernobyl ou de Fukushima) ont en commun d'avoir provoqué des coûts économiques de très grande ampleur (une ou plusieurs centaines de milliards d'euros dans chaque cas) qui affectent l'ensemble des économies concernées. Ce sont ces effets sur l'économie réelle des crises bancaires majeures qui, par

delà la mécanique de transmission des défaillances, leur donne un caractère systémique. Ce sont aussi les conséquences pour l'économie toute entière, par delà les victimes directement atteintes, qui donnent le même caractère systémique au risque nucléaire. La régulation du risque nucléaire pourrait s'inspirer de la régulation du risque bancaire systémique. Celle-ci impose dorénavant des exigences de fonds propres et de liquidités aux banques internationales pour pouvoir faire face aux situations les plus graves, comme le défaut de dettes souveraines ou une crise de liquidité généralisée. Des exigences de même nature pourrait être imposées aux opérateurs nucléaires afin de matérialiser dans leur bilan les ressources qui peuvent être nécessaires dans une période post-accidentelle et à plus long terme.

2 Remarques préliminaires

La question du risque d'accident nucléaire, dans sa dimension économique, se pose de manières très différentes selon qu'on se situe dans une logique d'indemnisation et de responsabilité ou dans une perspective d'analyse économique. Dans le premier cas, les principes juridiques et les mécanismes d'assurance sont en première ligne, dans le second il s'agit d'envisager l'ensemble des coûts associés à un accident nucléaire, qu'ils soient ou non de la responsabilité des opérateurs ou des Etats. Par ailleurs, la mesure du coût économique du risque nucléaire va bien au-delà de la mesure des coûts associés à un scénario d'accident bien défini, y compris de ceux des mesures post-accidentelles : il s'agit d'évaluer le coût pour la société de supporter un risque, qu'il soit probabilisable ou non-probabilisable. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer la charge que représente la potentialité d'un accident, et pas seulement d'évaluer ce que seraient les coûts dans tel ou tel scénario. Enfin, comme pour la plupart des risques, la prévention des accidents ne peut être envisagée indépendamment de la dimension économique du risque nucléaire : il y a une étroite interaction entre politique de prévention et évaluation économique des risques.

Trois ensembles de questions émergent lorsqu'on aborde le risque nucléaire dans sa dimension économique :

Questions de type 1 : Comment les politiques de prévention interagissent-elles avec les questions économiques ? Comment la responsabilité des opéra-

teurs nucléaires et les incitations à la prévention des risques sont-elles exercées ? Quels mécanismes organisationnels privilégier ? Par delà l'économie et le droit, ces questions ont des dimensions institutionnelles et même culturelles propres aux différents pays. Les opérateurs nucléaires français (notamment EDF) insistent sur le "culture du risque" et sur un mode d'organisation de la sûreté dans les centrales nucléaires françaises qui déconnecterait le coût économique des décisions de sûreté et faciliterait la transparence et la remontée d'information (notamment par les « filières indépendantes de sûreté » dans une approche bottom-up). Le mode d'intervention de l'INPO aux Etats-Unis est très différent, avec une logique top-down qualifiée par certains de "quasiment militaire". La catastrophe de la centrale de Fukushima-Daiichi a mis quant à lui en évidence les dysfonctionnements de TEPCO où les aspects culturels japonais sont souvent évoqués pour rendre compte de décisions opaques... Ces questions renvoient à des problèmes d'organisation, de culture du risque, d'incitation, de transparence de l'information et la pluridisciplinarité est requise pour en traiter de manière pertinente: sociologie des organisations, analyse cognitive, théorie des incitations sont les principaux champs disciplinaires concernés.

Questions de type 2 : Les mécanismes économiques qui sous-tendent la prévention des risques et l'exercice de la responsabilité des opérateurs nucléaires fonctionnent-ils de manière efficace ? Cette question de l'efficacité économique de la sûreté et de la responsabilité nucléaire se pose à la fois en termes de coûts et de partage de responsabilité. En termes de coûts, la concurrence, la tarification et l'organisation des marchés d'assurance conditionnent l'exercice de la responsabilité. Ces marchés permettent-ils un transfert efficace du risque nucléaire et, par exemple, le système des pools d'assurance est-il suffisamment concurrentiel ? Devrait-il être complété par des mécanismes d'auto-assurance des opérateurs (des captives nucléaires par exemple) et/ou par des innovations financières permettant des transferts de risques sur les marchés internationaux ? Les compétences requises sont ici celles de l'économie de l'assurance, de l'organisation industrielle et de l'économie financière. En termes de partage de responsabilité entre les exploitants et les Etats, et au-delà des textes (les conventions internationales notamment), qu'est-ce qui devrait être de la responsabilité des exploitants nucléaires et de celle des Etats ? Par exemple : comment la notion de préjudice écologique devrait-elle être prise en compte dans ce partage ? Par quels mécanismes l'Etat peut-il faciliter l'exercice de la responsabilité des opérateurs (les exemples de l'Indemnity Act au Japon ou des mécanismes mis en place en

Allemagne sont pertinents). Les compétences requises sont ici de nature juridique, mais directement en lien avec des questions économiques, qu'il s'agisse de droit de la responsabilité, de droit international ou de droit de l'assurance.

Questions de type 3 : Comment évaluer le coût économique du risque nucléaire ? Comment intégrer cette mesure dans l'ensemble des coûts externes des filières énergétiques ? Le risque d'un accident nucléaire est imparfaitement mutualisable, imparfaitement diversifiable, avec a priori une très faible probabilité d'occurrence. Il est aussi imparfaitement probabilisable (« ambigu ») et avec certaines conséquences potentiellement de très grande ampleur et de très long terme. Pour toutes ces raisons il s'écarte des règles classiques du calcul économique public. Comment évaluer l'effet de ces différentes composantes dans la « prime de risque » des activités nucléaires ? Comment insérer cette prime de risque dans le calcul économique, par exemple pour l'évaluation des projets d'investissement ou l'analyse coûts-bénéfices des choix technologiques ? Quel lien avec la question du taux d'actualisation ? Quels ordres de grandeur ? Une meilleure mutualisation des risques peut-elle réduire cette prime de risque. Les compétences requises sont celles de la microéconomie du risque et du calcul économique public dans l'incertain. Par ailleurs, un accident nucléaire a potentiellement des conséquences très importantes, mais avec une probabilité très faible et mal connue. Peut-on faire une analogie avec l'analyse des grandes crises financières ? Le provisionnement du risque bancaire systémique prévu par le Comité de Bâle peut-il être considéré comme similaire à un provisionnement adéquat du risque nucléaire ? Ceci devrait-il conduire à recommander un accroissement sensible des fonds propres des opérateurs nucléaires, comme dans le cas bancaire (accords de Bâle III) ? Les compétences requises sont celles de l'économie financière et bancaire. Les mécanismes de transferts financiers permettent-ils d'évaluer le coût économique du risque nucléaire ? Des « transferts alternatifs de risque » sont-ils envisageables pour le risque nucléaire (des cat-bonds nucléaires) et, au moins au niveau des principes, permettraient-ils de définir le coût économique de ce risque ? Les compétences requises sont ici celles de la finance et de l'économie de l'assurance et de la réassurance.

Ce sont ces questions de type 3 qui sont abordées dans la suite de ce rapport, mais elles interagissent inévitablement avec les deux autres ensembles de questions. En particulier, évaluer le coût économique du risque nucléaire est un ingrédient essentiel d'une politique visant à favoriser les politiques de prévention en donnant de bonnes incitations aux opérateurs et aussi en

fondant les signaux prix transmis aux consommateurs d'électricité sur des coûts qui incluent toutes les externalités associés à l'énergie nucléaire, notamment celle qui conduit à externaliser le risque d'un accident grave sur la collectivité.

3 Les spécificités du coût économique du risque nucléaire

L'estimation du coût économique d'un accident nucléaire doit aller au-delà des coûts supportés par l'opérateur nucléaire concerné et par les autorités nationales et locales. Ces coûts correspondent, aux dommages matériels et humains directement causés par la catastrophes, ainsi qu'aux dépenses publiques et privées prévues au titre du droit de la responsabilité nucléaire et qui sont susceptibles d'être couvertes, plus ou moins complètement, par des contrats d'assurance. Le coût économique a une portée plus large : il inclut l'ensemble des coûts supportés d'une manière ou d'une autre par les agents économiques à la suite d'un accident nucléaire, qu'ils fassent l'objet ou non d'une indemnisation, qu'ils se manifestent dans le court, moyen ou long terme, et quelle que soit la difficulté d'en calculer l'équivalent monétaire. Il comprend non seulement le coût du management post-accidentel (déplacements de population, décontamination, zones d'exclusion), mais aussi tous les effets directs (comme les conséquences sanitaires) ou indirects (comme les dommages à l'économie : effet sur le tourisme, l'hôtellerie, l'agriculture...), qu'il s'agisse d'effets directs sur la production issus de territoires contaminés ou d'effets indirects affectant l'ensemble de l'économie, comme par exemple les effets d'image qui réduisent la demande d'exportation.

Pour toute activité économique susceptible de causer des dommages, fussent-ils très improbables, la valeur économique de ces dommages aléatoires fait partie des coûts qui doivent être pris en compte pour en faire le bilan coûts-avantages, et orienter les choix des acteurs publics et privés en matière de consommation et de production. L'énergie nucléaire n'échappe pas à cette règle.

Pour la plupart des activités économiques, la tarification de l'assurance et les primes de risques demandées par les investisseurs qui investissent dans ces activités, fournissent une évaluation par le marché de cette composante du coût que représente le risque d'accident, qu'il s'agisse de dommages matériels

ou de responsabilité vis à vis des tiers (riverains d'un établissement à risque, clients susceptibles d'aller en justice, salariés risquant des accidents du travail ou des maladies professionnelles...). Ce n'est pas le cas pour le risque nucléaire à la fois du fait de la responsabilité limitée des opérateurs dans la plupart des pays, et du fait des limites imposées par le droit nucléaire dans le cadre des conventions internationales qui le régissent.

Même si la responsabilité des opérateurs nucléaires était illimitée, il est peu probable que les marchés d'assurance pourraient spontanément fournir une évaluation économique du risque nucléaire. Ce risque a en effet plusieurs caractéristiques qui le rendraient très difficilement assurable si on cherchait à s'affranchir des limites de responsabilités. Cinq caractéristiques du risque nucléaire nous éloignent en effet des critères traditionnels de l'assurabilité d'un risque :

3.1 Le risque d'accident nucléaire est imparfaitement mutualisable

Les accidents nucléaires graves sont des événements rares et de nature catastrophiques. Même si le système des pools d'assurance et de réassurance nucléaire étend le périmètre de la mutualisation autant que possible, la mutualisation ne peut se concevoir que pour des accidents d'ampleur limitée. En d'autres termes, le système des pools d'assurance et de réassurance ou les mutuelles d'opérateurs nucléaires peuvent mutualiser les risques dans le cadre de la responsabilité limitée des opérateurs, mais pas au-delà. Pour différentes raisons, il serait très difficile, même en dépassant les principes de responsabilité en vigueur dans le droit nucléaire et les conventions internationales, de concevoir un mécanisme qui garantirait une indemnisation complète des victimes directes ou indirectes d'un accident nucléaire grave : notamment le calcul des primes permettant un provisionnement adéquat et l'estimation à leur vraie valeur des dommages directs et indirects se heurteraient à des difficultés de coordination internationales insurmontables. En ce sens, au-delà des limites du droit de la responsabilité nucléaire et de l'organisation des marchés d'assurance, le risque nucléaire a une composante qui restera toujours très imparfaitement mutualisable, même si les Etats peuvent ressentir le besoin d'améliorer cette mutualisation, d'une part en accroissant leurs plafonds de responsabilité ainsi que ceux des opérateurs (c'est le sens du protocole de révision de la Convention de Paris) et d'autre part en garantissant la solvabilité des

systèmes d'assurance.

3.2 Le risque nucléaire est imparfaitement diversifiable

Du fait de son caractère rare et de très grande intensité, un accident nucléaire grave aurait des conséquences de nature macroéconomique ou systémique. Les rendements exigés par les investisseurs sur les différents actifs financiers susceptibles de composer un portefeuille incluent une prime de risque qui reflète leur aspect plus ou moins diversifiable. Il devrait en aller de même pour les investissements réels réalisés dans n'importe quel secteur de l'économie, et notamment pour ceux qui sont réalisés ou sous-traités par l'Etat. Dans le cas de l'énergie nucléaire, si on se limite au risque d'accident grave, on est en présence d'un aléa à forte composante systémique : dans un pays comme la France, une catastrophe nucléaire, toutes choses égales par ailleurs, de par l'ensemble de ses effets directs et indirects sur l'économie, aurait des conséquences potentiellement très importantes sur la richesse nationale, par exemple en mesurant l'évolution par le taux de croissance du PIB. Cet aspect systémique du risque nucléaire s'oppose aux risques d'assurance traditionnels qui sont de nature idiosyncratique : ceux-ci concernent un certain nombre d'agent économiques, mais ils ne sont pas susceptibles d'affecter la richesse nationale mesurée par exemple par un trend de croissance. Mesurer l'impact de cette composante systémique du risque nucléaire est similaire, dans son principe, à évaluer la prime de risque qu'un investisseur exigerait pour détenir un actif dont le rendement serait fortement corrélé à l'évolution d'un indice boursier. La composante catastrophique (faible probabilité et très forte intensité) rend cette mesure à la fois cruciale et difficile.

3.3 Le risque nucléaire est imparfaitement connu

On ne dispose pas d'historique de longue durée permettant d'estimer la fréquence des accidents nucléaires graves : il s'agit d'événements rares et on ne peut évidemment que s'en réjouir. Les études probabilistes de sûreté (PSA) visent à estimer la probabilité d'un accident nucléaire en décomposant les technologies en arbres d'événements et de décision. Elles conduisent à des probabilités de l'ordre de 10^{-6} dans le cas français, et de manière générale à des probabilités comprises entre 10^{-4} et 10^{-9} selon les caractéristiques du réacteur. Force est de constater que la fréquence observée des accidents

nucléaires graves (TMI en 1979, Chernobyl en 1986, Fukushima-Daiichi en 2011) s'écarte fortement de cet ordre de grandeur. Même si les technologies évoluent et que les mécanismes de supervision des risques diffèrent entre pays et sont aussi susceptibles d'amélioration, il n'en reste pas moins qu'il serait très hasardeux de prétendre que la probabilité d'un accident nucléaire grave en France est aujourd'hui connue avec une précision. En d'autres termes, en utilisant la terminologie des théoriciens des choix dans l'incertain, on peut dire que le risque nucléaire est un risque « ambigu », c'est-à-dire un risque dont on ne connaît pas précisément la loi de probabilité. Cette divergence entre les études probabilistes de sûreté et la fréquence observée des accidents nucléaires graves peut s'expliquer par le petit nombre d'observations ou la diversité des technologies (les accidents observés correspondant soit à des événements malheureux non-représentatifs statistiquement, soit à des contextes organisationnels et historiques spécifiques, soit à des technologies de sûreté inadéquates), ou par l'importance de facteurs insuffisamment pris en compte, et tout particulièrement de facteurs organisationnels et humains inévitables dans l'évaluation de risques. Quelle que soit l'explication, on ne peut que reconnaître cet écart entre l'évaluation des probabilités d'accident grave à laquelle conduisent les études probabilistes de sûreté et la fréquence de tels accidents.

3.4 Le risque nucléaire est de nature catastrophique

Il s'agit d'un risque impliquant potentiellement des dommages de très grande ampleur, mais dont la probabilité d'occurrence est très faible (en plus d'être imparfaitement connue). C'est cette nature catastrophique du risque nucléaire qui en fait le caractère imparfaitement diversifiable. Il existe d'autres risques qui ont cette double caractéristique d'être de très forte intensité et de faible probabilité, particulièrement les catastrophes naturelles de grande ampleur (tremblement de terre, ouragan). Les marchés d'assurance et de réassurance et les marchés financiers (par ce qu'on appelle les mécanismes de transfert alternatif des risques) permettent néanmoins la couverture de ces risques, au moins dans les économies les plus avancées. Il n'y aurait pas d'impossibilité théorique à concevoir un transfert des risques nucléaires sur les marchés financiers, afin d'en garantir le provisionnement et d'en connaître la valeur : en termes concrets, ceci reviendrait à demander à des investisseurs spécialisés (par exemple des hedge funds ou des fonds d'investissement spécialisés) la rémunération demandée pour accepter de provisionner tout ou

partie des coûts d'une catastrophe nucléaire. Si l'impossibilité n'est pas de nature théorique, elle est clairement pratique. L'ambiguïté du risque nucléaire rendrait très difficile la détermination du prix. Kunreuther et al. (1995), Cabantous (1997), Cabantou et al. (2011) ont montré que les assureurs avaient une forte aversion à l'ambiguïté qui se traduit par des tarifs de souscription d'autant plus élevés que la probabilité des risques couverts est imparfaitement connue. Bantwal et Kunreuther (2000) et Barriau et Loubergé (2009) ont interprété la taille limitée du marché des catbonds et la valeur élevée des spreads sur ce marché comme reflétant une aversion à l'ambiguïté des investisseurs¹: Dieckmann (2008) et Zhu (2011) en ont proposé des modélisations. Il n'en reste pas moins vrai que, si l'ambiguïté est une caractéristique importante du risque nucléaire, cette dimension est renforcée par le caractère catastrophique du risque. Ceci fait partie de son coût économique et doit être pris en compte dans l'évaluation de son coût pour la société.

3.5 Le risque nucléaire peut conduire à des dommages sur le très long terme

Le fait que les conséquences d'un accident nucléaire puisse se faire ressentir sur le très long terme pose la question du choix du taux d'actualisation pour la valorisation des dommages. Cette question a fait l'objet de débats à propos notamment du changement climatique, particulièrement à la suite du rapport Stern (2007). La « règle de Ramsey » constitue un point de départ pour l'évaluation d'un taux d'actualisation susceptible de guider la décision publique. Cette règle caractérise les arbitrages intertemporels qui sont présents dans toute opération d'investissement, et notamment dans le cas du risque nucléaire aux investissements de prévention qui ont des coûts immédiats mais permettent de réduire des dommages à long ou très long terme. La règle de Ramsey définit le taux d'actualisation r par la formule

$$r = \delta + g\gamma \tag{1}$$

où δ est un pur taux de préférence pour le présent, g est le taux de croissance de la consommation et γ est « l'indice relatif d'aversion pour le risque ».

¹Voir Cummins-Lalonde-Phillips (2004) et Froot (1999) sur les raisons pour lesquelles le marché des catbonds est de taille relativement réduite avec des spreads particulièrement élevés.

δ représente l'arbitrage entre générations : par exemple si δ est égal 3%, cela signifie que les préférences sociales conduisent à accepter de se priver de une unité de revenu national l'année t si cela permet d'obtenir 1.03 unité de revenu supplémentaire l'année $t + 1$. La règle de Ramsey nous dit que le taux d'actualisation doit ajouter à ce taux de préférence pour le présent un terme correctif proportionnel au taux de croissance de l'économie car les perspectives de croissance réduisent la propension des agents économiques à se priver de ressources présentes pour accroître les ressources futures, d'où un accroissement du taux d'actualisation. Stern (2007) fait l'hypothèse $\delta = 0.1\%$ (ce qui correspond à un très faible taux de préférence pour le présent et traduit le souci d'une équité intergénérationnelle), $g = 1.3\%$ et $\gamma = 1$, ce qui donne $r = 1.4\%$, c'est-à-dire un taux d'actualisation très faible et rend profitable de nombreux projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Nordhaus (2008) réfute ces conclusions en arguant du fait que le taux de préférence pour le présent devrait davantage refléter des valeurs cohérentes avec les choix effectués sur les marchés financiers.

Une autre question, essentielle dans le cas du risque nucléaire, concerne la manière dont les aléas affectant tant le risque d'accident lui-même que la croissance économique modifient la règle de Ramsey. La règle de Ramsey généralisée à un environnement risqué devient

$$r = \delta + g\gamma - \frac{\gamma^2\sigma^2}{2} \quad (2)$$

où σ représente la volatilité de la consommation future. Le troisième terme de cette expression traduit un effet de précaution : une augmentation de l'incertitude sur la consommation future (c'est-à-dire un accroissement de σ) augmente la valeur d'un euro supplémentaire déplacé dans le futur, ce qui réduit le taux d'actualisation.

S'interroger sur la valeur économique du risque nucléaire pour la société, c'est de manière équivalente chercher à répondre à la question suivante : qu'est-ce que la société est-elle prête à payer (c'est-à-dire : de quelle fraction du revenu national serions-nous prêt à nous priver ?) pour éliminer ce risque. Comme on l'a indiqué plus haut, pour la plupart des activités décidées par les individus ou les entreprises (consommer, produire, investir...) ce sont les marchés qui fournissent la réponse. Un individu accepte de conduire une automobile si, entre autres coûts, la prime d'assurance n'est pas prohibitive, et si cette prime lui semble trop élevée, il devrait ne pas avoir de véhicule personnel et se limiter aux transports en commun. Une entreprise

se lancera dans une nouvelle activité si elle peut transférer une partie des risques à des investisseurs, par exemple en émettant de nouvelles actions ou en s'endettant, etc... La décision publique doit être considérée de manière spécifique dans la mesure où, en général, l'Etat ne transfère pas les risques de ses investissements vers des investisseurs privés .

4 La prime de risque de l'énergie nucléaire

4.1 Notion de prime de risque

Le montant qu'un agent économique (individu, entreprise) est prêt à perdre pour ne plus courir un certain risque est appelé en théorie microéconomique la « prime de risque ». On peut la définir de la manière suivante. Envisageons le cas d'un individu dont la richesse finale w_f (en termes concrets : la richesse à un certain horizon temporel) est composée d'un élément sans risque w (la « richesse initiale ») et d'un élément aléatoire X . Nous supposons que X est une variable aléatoire d'espérance mathématique m et d'écart type σ . On suppose donc que $w_f = w + X$. Du fait de cet élément aléatoire X , la richesse finale w_f est elle-même aléatoire et elle correspond à ce que les théoriciens des choix dans l'incertain appellent une « loterie », c'est-à-dire une représentation des gains ou des pertes de l'individu sous forme de variable aléatoire. Notre individu est supposé avoir de « l'aversion pour le risque », c'est-à-dire qu'il préférerait s'il le pouvait remplacer cette loterie w_f par son espérance mathématique qui est $w + m$. Il serait même prêt à remplacer la loterie w_f par un gain certain inférieur à cette espérance mathématique. Ce gain certain minimal que le décideur accepterait en remplacement de la loterie w_f est appelé « équivalent certain » de la loterie. Notons $w + m - \rho$ cet équivalent certain, avec $\rho > 0$: en d'autres termes ρ représente ce que l'individu serait prêt à perdre en partant de l'espérance mathématique de sa richesse pour ne plus courir de risque. Par définition, ρ est la « prime de risque » de la loterie.

Le modèle fondamental de la théorie des choix dans l'incertain qui permet de définir plus explicitement cette prime de risque est celui de la « théorie de l'espérance d'utilité ». Il conduit, sur la base d'axiomes, à représenter les préférences que les individus ont sur les loteries par une fonction appelée « fonction d'utilité ». Notons u une telle fonction. Elle associe un nombre $u(w_f)$ à toute valeur de la loterie, c'est-à-dire ici de la richesse finale w_f . On

peut supposer que cette fonction d'utilité est croissante puisque la satisfaction de l'individu augmente lorsque sa richesse finale s'accroît : on a donc $u' > 0$. L'individu compare les loteries sur la base de l'espérance mathématique de leur utilité $Eu(w_f)$. Un individu qui raisonnerait uniquement en termes de valeur moyenne, plus précisément qui considérerait qu'une loterie est meilleure qu'une autre si son espérance mathématique est supérieure, valoriserait implicitement les loteries par une fonction d'utilité $u(w_f) = w_f$, c'est-à-dire qu'il ne distinguerait pas l'utilité de la loterie de la loterie elle-même. On aurait en effet dans ce cas

$$Eu(w_f) = Ew_f = w + m,$$

et pour cet individu seul comptera l'espérance mathématique de sa richesse $w = m$. On dit dans ce cas que l'individu est « neutre vis-à-vis du risque ». Il n'en va plus de même pour un individu qui a de l'aversion pour le risque, puisqu'il préfère avoir $w + m$ plutôt que la loterie w_f . Cette aversion pour le risque de l'individu correspond au cas où la fonction d'utilité $u(w_f)$ est concave, c'est-à-dire au cas où la dérivée de la fonction est décroissante : en termes concrets, ceci revient à supposer que l'accroissement d'utilité provoqué par un accroissement de 1 euro de la richesse finale est plus grand lorsque cette richesse est faible que lorsqu'elle est élevée. En termes mathématique, la dérivée de la fonction d'utilité est décroissante et la dérivée seconde est donc négative : $u'' < 0$. On a dans ce cas

$$Eu(w_f) < u(w + m),$$

c'est-à-dire que l'individu préfère strictement disposer de l'espérance mathématique de sa richesse $w + m$ plutôt que d'être confronté aux aléas que représente la variable aléatoire X . La prime de risque ρ est alors définie par

$$Eu(w_f) = u(w + m - \rho). \tag{3}$$

Comme on l'a dit, il s'agit de la réduction de la richesse finale espérée qui est acceptée par l'individu pour éliminer le risque.

On comprend intuitivement que la prime de risque dépend à la fois des caractéristiques de la loterie et du degré d'aversion pour le risque de l'individu : une loterie très incertaine (disons pouvant rendre des valeurs très grandes ou très petites) représente plus de risque pour l'individu qu'une loterie qui n'est pas susceptible de dévier beaucoup de son espérance mathématique,

et on conçoit que la prime de risque soit plus grande pour la première que pour la seconde. Par ailleurs, un individu qui a une forte aversion pour le risque serait prêt à davantage se priver pour éliminer un risque qu'un autre individu moins sensible au risque, et la prime de risque du premier devrait logiquement être plus grande que celle du second. L'approximation de Arrow-Pratt permet de mettre en évidence ces propriétés. On montre en effet que si le risque supporté par l'individu n'est pas trop grand, la prime de risque est approximativement définie par

$$\rho = \sigma^2 \frac{A(w+m)}{2}, \quad (4)$$

où $A(w_f) = -u''(w_f)/u'(w_f)$ est appelé « indice absolu d'aversion pour le risque ». En d'autres termes, la prime de risque est proportionnelle à la variance de la loterie σ^2 , le coefficient de proportionnalité traduisant la plus ou moins grande aversion pour le risque de l'individu.

4.2 La prime de risque d'une décision publique

Venons-en à présent au cas d'une décision publique dont les conséquences sont incertaines. Notons X ces conséquences en termes de revenu national, avec toujours m l'espérance mathématique et σ l'écart-type de X . L'individu envisagé ci-dessus est maintenant membre d'une population comprenant N individus. Pour simplifier, supposons également que tous ces individus aient le même degré d'aversion pour le risque : leurs préférences sont représentées par la même fonction d'utilité $u(w_f)$ et donc par le même indice absolu d'aversion pour le risque $A(w_f)$. L'aléa X peut potentiellement prendre des valeurs élevées (par exemple à l'échelle des dommages auquel un investissement public de grande taille peut conduire en cas d'accident) et on le répartit de manière égale entre tous les individus de sorte que chaque individu en reçoive la fraction X/N . La richesse finale d'un individu s'écrit maintenant

$$w_f = w + \frac{X}{N}.$$

Notons ρ^i la prime de risque d'un individu particulier lorsqu'il est confronté à cette loterie qui maintenant s'écrit $w + X/N$. Observons que la variance de la variable aléatoire X/N est égale à σ^2/N^2 puisque la variance de X est σ^2 . En utilisant l'approximation de Arrow-Pratt, on obtient

$$\rho^i = \sigma^2 A(w + m/N)/2N^2.$$

La prime de risque agrégée ρ^N , c'est-à-dire ce que la société dans son ensemble serait prête à payer pour remplacer la variable aléatoire X par son espérance mathématique m (chaque individu ayant alors une richesse finale égale à $w + m/N$) est égale à la somme des primes de risques individuelles, c'est-à-dire

$$\rho^N = N\rho^i = \sigma^2 A(w + m/N)/2N.$$

On observe donc que la prime de risque agrégée ρ^N se réduit lorsque N s'accroît et qu'elle tend vers 0 lorsque N tend vers l'infini. Ce résultat est connu sous l'expression de « théorème de Arrow-Lind »² : il montre la force du principe de mutualisation lorsqu'un risque peut être réparti entre un grand nombre d'individus. L'effet de réduction de la prime de risque de chaque individu l'emporte sur l'effet d'accroissement du nombre d'individus, de sorte que la prime de risque agrégée est négligeable lorsque le nombre d'individus concernés est grand.

Le théorème de Arrow-Lind est le fondement des méthodes d'analyse coûts-avantages de la décision publique : il exprime que le décideur public doit se comporter comme s'il était neutre au risque et ne pas incorporer de prime de risque dans l'évaluation des conséquences de ses décisions. Par exemple, pour calculer la valeur actuelle nette d'un projet d'investissement public, il convient d'utiliser un taux d'actualisation sans risque et d'évaluer les coûts et les bénéfices de ce projet par leur espérance mathématique.

Le théorème de Arrow-Lind repose crucialement sur un certain nombre d'hypothèses :

- La mutualisation parfaite des risques : dans ce qui précède, nous avons supposé que le risque total X était uniformément réparti entre tous les individus, chacun d'entre eux étant concerné par la même part de ce risque X/N .
- Il n'y a pas de corrélation entre le risque associé à la décision publique et la richesse détenue par les individus en dehors de ce risque : c'est ce que nous avons traduit par l'hypothèse d'une « richesse initiale » w sans risque.
- Les gains et les pertes associées à la décision publique sont suffisamment modérés pour que l'on puisse s'appuyer sur l'approximation de Arrow-Pratt.

²Voir Arrow-Lind (1970).

- La loi de probabilité qui définit la variable aléatoire X est parfaitement connue.
- Les préférences s'expriment comme des préférences individuelles sur des perspectives aléatoires (ce que nous avons appelé des loteries).

Comme on l'a vu, aucune de ces hypothèses n'est vérifiée dans le cas du risque nucléaire : la mutualisation des risques de catastrophe nucléaire serait très imparfaite, le risque nucléaire a une dimension systémique, il est susceptible de causer des dommages de très grande ampleur, sa loi de probabilité est très mal connue et il est associé à des arbitrages intergénérationnels qui ne peuvent être réduits à de simples choix entre des loteries par les générations présentes à un moment du temps donné. Calculer le coût économique du risque nucléaire sur la base d'une espérance mathématique de dommages en s'inspirant du théorème de Arrow-Lind n'a donc aucun fondement. Pour être plus explicite, un calcul consistant à multiplier la valeur des dommages pour un scénario d'accident par une estimation de la probabilité d'occurrence d'un tel scénario pour obtenir une espérance mathématique de dommages, puis à diviser le résultat obtenu par la valeur de l'électricité d'origine nucléaire (le tout étant calculé par an et pour un certain parc de réacteurs) a un sens mathématique, mais n'a aucune signification économique. On ne peut rien en déduire de ce que représente effectivement le risque nucléaire pour l'économie, que ce soit pour apprécier la désirabilité de choix énergétiques, la prévention des risques, le calcul des coûts sociaux et la tarification de l'énergie. Pour traiter de la valeur économique du risque nucléaire de manière pertinente, il faut nécessairement aborder de manière frontale les différentes raisons qui font que le théorème de Arrow-Lind ne s'applique pas.

4.3 Effet de la mutualisation imparfaite du risque nucléaire

L'effet de la mutualisation imparfaite du risque nucléaire est bien illustrée par l'étude de Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000). Leur modèle peut être résumé de la manière suivante. Chaque individu dans la population a une fonction d'utilité

$$u(w_f) = \frac{1}{1-\gamma} w_f^{1-\gamma}, \quad (5)$$

où γ est l'indice relatif d'aversion pour le risque. Le cas neutre au risque correspond à $\gamma = 0$, mais les valeurs le plus souvent retenues en pratique sont supérieures à 2, et parfois beaucoup plus élevées. Les individus peuvent

être dans S situations possibles indicées par $i = 1, \dots, S$, chaque état i ayant une probabilité p_i , avec $p_1 + p_2 + \dots + p_S = 1$. Notons x_i la fraction de la richesse initiale w (la même pour tous les individus) perdue dans l'état i . L'espérance d'utilité d'un individu s'écrit donc

$$Eu(w_f) = \frac{1}{1-\gamma} \sum_{i=1}^S p_i [w(1-X_i)]^{1-\gamma}.$$

Soit M_A la fraction maximale de la richesse que les individus seraient prêt à abandonner pour ne pas être exposé à la loterie définie par les pertes X_i et leur probabilités p_i . En d'autres termes $w(1-M_A)$ est l'équivalent certain de la richesse des individus. L'égalité entre l'expression de $Eu(w_f)$ donnée ci-dessus et l'utilité de l'équivalent certain, c'est à dire

$$\frac{1}{1-\gamma} [w(1-M_A)]^{1-\gamma},$$

donne la prime de risque relative

$$M_A = 1 - \left[\sum_{i=1}^S p_i (1-X_i)^{1-\gamma} \right]^{\frac{1}{1-\gamma}}.$$

Si les individus sont neutres au risques, c'est à dire si $\gamma = 0$, cette expression devient

$$M_N = \sum_{i=1}^S p_i X_i,$$

c'est à dire l'espérance mathématique des dommages. Le rapport

$$\frac{M_A}{M_N} = \frac{1 - \left[\sum_{i=1}^S p_i (1-X_i)^{1-\gamma} \right]^{\frac{1}{1-\gamma}}}{\sum_{s=1}^S p_s X_s}$$

indique donc le coefficient multiplicatif par lequel il faut multiplier l'espérance mathématique des dommages pour obtenir le véritable coût supporté par les individus du fait de leur aversion pour le risque. Il exprime donc la prime de risque en proportion de l'espérance mathématique des dommages.

Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) illustrent cette approche en se plaçant dans le cadre d'un scénario de référence ST21, avec des hypothèses proches de celles retenues dans le projet ExternE.³ Les auteurs distinguent

³Voir Dreicer, Tort et Manen (1995).

Table 6. Lotteries faced by the three groups of individuals

Group	States of the world	% loss of wealth (X_i)	Probability (p_i)
First group, local and relocated individuals ($N_1=9600$ individuals)	Local relocated + fatal effect	97.75	2.5 E-10
	Local relocated + non-fatal effect	9.74	4.9 E-10
	Local relocated + no health effect	0.39	9.993 E-07
	No accident	0	9.99999 E-01
Second group, local and no relocated individuals ($N_2=1990200$ individuals)	Local not relocated + fatal effect	97.38	2.5 E-10
	Local not relocated + non-fatal effect	9.36	4.9 E-10
	Local not relocated + no health effect	0.02	9.993 E-07
	No accident	0	9.99999 E-01
Third group, regional individuals ($N_3=54$ millions individuals)	Regional + fatal effect	97.38	5.6 E-11
	Regional + non-fatal effect	9.36	1.1 E-10
	Regional + no health effect	0.004	9.996 E-07
	No accident	0	9.99999 E-01

deux zones : une zone locale à moins de 100km de la centrale où certains habitants doivent être évacués et relogés, avec 2 millions d'habitants, et une zone régionale plus éloignée avec 54 millions d'habitants. Dans chaque cas, les habitants peuvent subir des dommages sanitaires, avec une issue fatale pour certains d'entre eux. Au total, il y a 12 états de la nature, dont les probabilités sont données dans la Table 6 (numérotation de l'article). Les dommages pris en compte dans le calcul des coûts comprennent les coûts de relocalisation des habitants, d'interdiction de consommation de produits agricoles, des effets sur la santé et des effets indirects. Le paramétrage s'appuie sur les données de l'étude ExternE. On notera particulièrement que dans chaque groupe d'individus il n'y a pas de mutualisation des risques : la perte de richesse n'existe qu'en cas d'accident et elle est plus ou moins importante selon que l'importance des conséquences sur la santé et selon que l'individu doit ou ne doit pas être relocalisé.

Pour chaque catégorie d'individu ($j = 1, 2, 3$) le tableau 2 (Table 7 de l'article) donne les valeurs des coefficients M_A et M_N que nous avons définis ci-dessus (respectivement notés M_{A_j} et M_{N_j}). On obtient un coefficient global M en faisant le rapport de la somme des M_{A_j} et M_{N_j} pondérées par le nombre d'individu N_j dans chaque groupe j , c'est à dire

$$M = \frac{N_1 M_{A1} + N_2 M_{A2} + N_3 M_{A3}}{N_1 M_{N1} + N_2 M_{N2} + N_3 M_{N3}}.$$

M mesure donc la proportion par laquelle il faut multiplier l'espérance mathématique des dommages d'un accident nucléaire pour obtenir ce que l'ensemble

Table 7. Calculation of multiplying factor for each group of individuals

	First group local and relocated (j=1)	Second group local and no relocated (j=2)	Third group regional (j=3)
$M_{A_i} = 1 - \sum_{i=1}^4 p_i (1-X_i)^{-1}$	1.5 E-08	9.6 E-09	2.1 E-09
$M_{N_j} = \sum_{i=1}^4 p_i X_i$	4.2 E-09	4.9 E-10	1.0 E-10

Table 8. Sensitivity analysis on the multiplying factor

Value of the relative risk aversion coefficient (A_r)	0.5	1.2	2	2.5	3
Multiplying factor (M)	2	2	20	83	385

des individus seraient prêt à payer pour éviter un tel accident. La Table 7 (numérotation de l'article) donne le résultat du calcul en fonction de l'indice relatif d'aversion pour le risque que nous avons noté γ (A_r dans le tableau). Le coefficient M est supérieur à 1 comme prévu, et il croît avec l'aversion pour le risque. Ce qui est le plus frappant, c'est l'extrême sensibilité de la relation entre γ et M . Pour γ inférieur à 1.2, M reste approximativement égal à 2. En d'autres termes, un faible degré d'aversion pour le risque conduit à doubler l'espérance mathématique des dommages pour obtenir ce que nous pouvons appeler le coût social du risque nucléaire. Toutefois, quand γ prend des valeurs plus grande, M augmente de manière exponentielle : passant à 20 quand $\gamma = 2$, à 83 quand $\gamma = 2.5$ et à 385 quand $\gamma = 3$. Les auteurs considèrent qu'une valeur $\gamma = 2$ est raisonnable. C'est une question difficile à trancher car il n'existe pas d'évidence claire sur cette question, et certains auteurs argumentent dans le sens d'une valeur bien plus grande de l'indice relatif d'aversion pour le risque.

La principale conclusion que nous pouvons tirer de cette étude c'est que la conclusion inspirée du théorème de Arrow-Lind est non seulement invalidée par le caractère imparfaitement mutualisable du risque nucléaire, mais que cette remise en cause est très forte : un calcul qui serait simplement fondé sur l'espérance mathématique des pertes serait très éloigné d'une évaluation significative de ce risque. Cette étude ne nous suggère pas une méthode pragmatique pour progresser vers l'évaluation du risque tant les résultats sont sensibles aux hypothèses, mais au moins elle met clairement en évidence une erreur à ne pas commettre.

4.4 Les effets macroéconomiques et le taux d'actualisation

La deuxième raison pour laquelle le théorème de Arrow-Lind ne peut s'appliquer au cas du risque nucléaire concerne les effets macroéconomiques d'un hypothétique accident nucléaire. Pour expliquer la manière dont ces effets devraient être pris en compte dans la valorisation du risque nucléaire, commençons par une modélisation macroéconomique simple qui permettent également de traiter du choix du taux d'actualisation.⁴ Faisons l'hypothèse d'une économie caractérisée par une suite de périodes (disons des années) indicées par $t = 0, 1, 2, \dots$, la période $t = 0$ correspondant à la période courante. Prenons comme donnée les perspectives de croissance économique telles qu'elles existent en dehors du risque nucléaire et représentons les par une séquences c_0, c_1, c_2, \dots où c_t représente la consommation d'un individu représentatif de l'ensemble de la population du pays à la période t . On suppose qu'il y a un grand nombre d'individus du même type dans cette économie. Cette séquence est aléatoire à partir de $t = 1$ car elle dépend de l'ensemble des chocs macroéconomiques susceptibles d'affecter la richesse nationale dans l'avenir. c_t est donc une variable aléatoire pour $t = 1, 2, \dots$. L'attitude vis à vis du risque de notre individu représentatif est modélisée ici encore par le critère de l'espérance d'utilité, mais maintenant dans une perspective intertemporelle. A chaque période t , le consommateur représentatif ressent une satisfaction $u(c_t)$ qui dépend de sa consommation c_t , avec $u' > 0$ et $u'' < 0$, cette dernière inégalité traduisant l'aversion pour le risque. On note comme précédemment δ le taux de préférence pour le présent et le bien-être intertemporel de notre individu représentatif est mesuré par la somme actualisée au taux δ de son flux d'espérance d'utilité présente et future que nous notons V_0 , avec

$$V_0 = \sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} E u(c_t).$$

Nous considérons une activité économique (la production d'énergie nucléaire pour ce qui nous intéresse ici, mais le raisonnement s'applique à tout projet d'investissement dans lequel la collectivité investit des ressources) conduisant à un flux de cash-flows aléatoires X_0, X_1, X_2, \dots où X_t représente la valeur des produits réalisés, nette de l'ensembles des coûts sociaux (notamment des coûts qui pourraient résulter d'un accident). Supposons que chaque individu reçoive (en plus ou en moins) une fraction ε des bénéfices nets X_t . On a $\varepsilon = 1/N$ si l'économie comprend N individus et que les bénéfices et

⁴On s'inspire ici de la présentation de Gollier (2007)

les coûts sont parfaitement mutualisés. La production d'énergie nucléaire conduit donc à un niveau de bien-être V_1 défini par

$$V_1 = \sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} Eu(c_t + \varepsilon X_t).$$

Comme ε est petit (puisque N est grand), on a $V_1 > V_0$, c'est à dire que la production d'énergie nucléaire accroît le bien-être de notre individu représentatif si

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} Eu(c_t + \varepsilon X_t) \right] |_{\varepsilon=0} > 0,$$

c'est à dire si

$$\sum_{t=0}^{\infty} e^{-\delta t} E[X_t u'(c_t)] > 0.$$

X_0 et c_0 étant certains, nous pouvons réécrire cette condition de la manière suivante :

$$VAN = X_0 + \sum_{t=1}^{\infty} e^{-r_t t} B_t > 0, \quad (6)$$

où

$$e^{-r_t t} = e^{-\delta t} \frac{Eu'(c_t)}{u'(c_0)}, \quad (7)$$

$$B_t = \frac{E[X_t u'(c_t)]}{Eu'(c_t)}. \quad (8)$$

Nous déduisons donc de (6) que l'activité est socialement efficace si sa valeur actualisée nette VAN est positive en utilisant le taux d'actualisation r_t donné par (7) et en définissant la bénéfice équivalent certain B_t par (8). Intéressons nous de plus près à ces deux paramètres r_t et B_t .

Le taux d'actualisation

La formule (7) qui définit le taux d'actualisation peut se réécrire

$$r_t = \delta - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{Eu'(c_t)}{u'(c_0)} \right].$$

Cette formule est une formule standard de finance qui définit la structure par terme des taux d'intérêt. On peut la spécifier davantage en supposant à nouveau que la fonction d'utilité a la forme (5) qui correspond au cas d'un indice relatif d'aversion pour le risque constant et égal à γ et d'autre part que le logarithme de la consommation suit un mouvement Brownien

de tendance g et de volatilité σ . En d'autres termes $\ln c_t$ est normalement distribué d'espérance $gt + \ln c_0$ et de variance $\sigma^2 t$. Sous ces deux hypothèses, on montre que⁵

$$\frac{Eu'(c_t)}{u'(c_0)} = e^{-\gamma t(g - 0.5\gamma\sigma^2)},$$

et donc

$$r_t = \delta + \gamma g - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2,$$

c'est à dire la formule (2). Pour des préférences données (c'est à dire pour des valeurs de δ et γ de la préférence pour le présent et de l'aversion pour le risque), le taux d'actualisation est d'autant plus grand que le taux de croissance est grand et que la volatilité de cette croissance est faible. Le premier effet est un effet d'enrichissement : si on anticipe une forte croissance dans l'avenir, on sera moins porté à transférer de la richesse de t à $t' > t$ car l'individu souhaite lisser sa consommation dans le temps. Le deuxième effet est un effet de précaution : une richesse future plus incertaine conduit l'individu à vouloir transférer davantage de richesse de t à $t' > t$ pour se rémunérer contre les aléas qui sont d'autant plus grand que l'horizon est reculé.

Gollier (2007) calibre la formule (2) en supposant $g = 2\%$ par an et $\sigma = 2\%$ (pour reproduire approximativement le trend de croissance du PIB par habitant au vingtième siècle), $\delta = 0$ pour des raisons d'éthique intergénérationnelle (on a vu que le rapport Stern prenait une valeur très faible de δ pour les mêmes raisons), $\gamma = 2$ qui semble une valeur raisonnable (les expériences sur l'attitude vis à vis du risque des individus donnent en général des valeurs comprises entre 1 et 4). On obtient alors

$$r_t = 0 + 2 \times 0.02 - \frac{1}{2} \times 4 \times 0.0004 = 0.0392.$$

Avec ces valeurs, le taux d'actualisation est donc égal à 3.92% et il est indépendant de l'horizon retenu. On constate que l'essentiel du résultat dépend de l'effet de richesse, l'effet de précaution de jouant que de manière marginale pour baisser le taux de 4% à 3.92%.

Le fait que le taux d'actualisation soit constant réduit considérablement les effets à long terme puisque leur pondération décroît de manière exponentielle. Dans le cas d'un risque nucléaire dont les conséquences peuvent se

⁵Cela se montre facilement en utilisant le fait que l'approximation de Arrow-Pratt est exacte dans le cas envisagé.

faire ressentir à très long terme, c'est évidemment une question essentielle. Le résultat de constance du taux d'actualisation dépend en fait crucialement de l'hypothèse selon laquelle le trend de croissance était déterministe. Si on a une incertitude sur ce trend de croissance, alors le taux d'actualisation n'est plus constant. Gollier (2007) considère le cas où le trend de croissance g prend n valeurs possibles g_1, g_2, \dots, g_n avec des probabilités p_1, p_2, \dots, p_n . La formule (2) devient alors

$$r_t = \delta - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2 - \frac{1}{t} \ln \left(\sum_{i=1}^n p_i e^{-\gamma g_i t} \right).$$

Contrairement au cas Brownien de la formule (2), le taux d'actualisation dépend maintenant de l'horizon temporel t . Le taux r_t est décroissant avec t , avec un taux de court terme

$$r_{t \rightarrow 0} = \delta - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2 + \gamma \left(\sum_{i=1}^n p_i g_i \right),$$

et un taux de long terme

$$r_{t \rightarrow \infty} = \delta - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2 + \gamma \min_i g_i.$$

Par exemple, si on considère qu'il y a autant de chance que le trend de croissance soit de 1% ou de 3%, le taux d'actualisation de court terme est égal à 3.92% et il baisse à 1.92% à long terme.

Le bénéfice équivalent certain.

Lorsqu'il n'y a pas de corrélation entre les bénéfices nets de l'activité et la croissance, c'est à dire lorsque les variables aléatoires c_t et X_t sont indépendantes, alors

$$E[X_t u'(c_t)] = EX_t \cdot Eu'(c_t),$$

et la formule (8) devient

$$B_t = EX_t.$$

En d'autres termes, dans ce cas le bénéfice net à la période t est égal à l'espérance mathématique de la valeur nette des produits réalisés à cette période, de sorte que

$$VAN = X_0 + \sum_{t=1}^{\infty} e^{-rt} EX_t. \quad (9)$$

La valeur actualisée nette du projet est égale à la somme actualisée des bénéfices nets réalisés, c'est à dire que l'évaluation sociale de l'activité dit se faire sous une hypothèse de neutralité au risque. On reconnaît ici le théorème de Arrow-Lind.

Considérons à présent le cas où X_t et c_t sont corrélés. Ce sera le cas lorsque l'activité envisagée a des effets macroéconomiques. Concrètement, dans le cas qui nous préoccupe, ceci signifie que les risques de l'activité nucléaire sont susceptibles d'exercer un impact sur la richesse agrégée du pays. On peut réécrire la formule (8) sous la forme suivante :

$$B_t = EX_t + \frac{\text{cov}(X_t, u'(c_t))}{Eu'(c_t)}. \quad (10)$$

Supposons que X_t et c_t soient corrélés positivement. Comme $u'' < 0$, la covariance entre X_t et $u'(c_t)$ est négative et on a donc $B_t < EX_t$. Le bénéfice certain équivalent B_t est donc inférieur à l'espérance mathématique du bénéfice net EX_t . Ceci signifie que le bénéfice certain équivalent s'obtient en déduisant une prime de risque.⁶

4.5 L'ambiguïté du risque nucléaire

Le risque nucléaire est imparfaitement connu. Cette information imparfaite peut correspondre à une variance plus grande des dommages, et donc à une prime de risque plus importante. Ce contexte d'information imparfaite sur les risques nous éloigne d'un univers où le décideur public doit arbitrer entre diverses loteries selon son degré d'aversion pour le risque. En particulier, ce décideur peut avoir de l'aversion à l'ambiguïté et la prime de risque devrait en tenir compte. Par exemple, Maccheroni, Marinacci et Ruffino (2012) modélisent les préférences d'un décideur pour une décision dont les conséquences dépendent d'une loi de probabilité que celui-ci connaît imparfaitement. Plus précisément, il sait que cette loi appartient à une famille de lois de probabilité et il a des croyances subjectives sur ces lois, représentées par une distribution de probabilité dans cette famille. En termes concrets, le décideur attribue une

⁶Les approximations $u'(c_t) \simeq u'(\bar{c}_t) + (c_t - \bar{c}_t)u''(\bar{c}_t)$ et $Eu'(c_t) \simeq u'(\bar{c}_t)$, où $\bar{c}_t = Ec_t$, donnent $B_t \simeq EX_t - \gamma \text{cov}(X_t, c_t)/\bar{c}_t$ en notant $\gamma = -\bar{c}_t u''(\bar{c}_t)/u'(\bar{c}_t)$ l'indice relatif d'aversion pour le risque. On obtient donc une formule similaire à celle du Modèle d'Evaluation Des Actifs Financiers (MEDAF) où la prime de risque $EX_t - B_t$ est proportionnelle à la covariance entre le produit net de l'activité X_t et la consommation par habitant c_t (en pratique, plutôt le PIB par habitant).

certaine probabilité à chaque loi possible. Son "aversion à l'ambiguïté" se traduit par le fait que réduire l'incertitude sur la loi de probabilité améliore son bien-être, en plus de son aversion pour le risque qui exprime qu'il préférerait ne pas être exposé aux aléas d'une loi de probabilité quelque'elle soit. Les auteurs montrent que l'équivalent certain d'un risque s'obtient en déduisant de l'espérance mathématique du gain un prime de risque fonction de l'aversion pour le risque de l'individu⁷, mais aussi une "prime d'ambiguïté" qui traduit la variabilité de l'espérance mathématique de gain en fonction des croyances de l'individu.

Une manière d'appréhender cette prime d'ambiguïté consiste à analyser les spread de taux exigés par les investisseurs sur des titres dont le rendement dépend d'événements catastrophiques dont la loi de probabilité correspond à la survenance d'événements rares et est mal connue, notamment des catbonds. Zhu (2011) étudie un modèle théorique de tarification d'un catbond avec aversion au risque et à l'ambiguïté et il montre que le spread (exprimé en pourcentage de l'espérance mathématique de perte subie par l'émetteur) devrait effectivement être plus élevé pour les catbonds correspondant à des risques conduisant à une faible probabilité de déclenchement (c'est à dire pour une faible probabilité d'occurrence de la catastrophe). Ceci va dans le sens des observations de Cummins-Lalonde-Phillips (2004) sur la tarification des catbonds. Pour ce qui nous concerne, ceci signifie que l'effet de l'ambiguïté sur la valeur économique du risque est particulièrement fort pour les risques à faible probabilité comme le risque nucléaire.

5 La dimension systémique du risque nucléaire

Le risque d'accident nucléaire a toutes les caractéristiques d'un risque systémique, c'est à dire d'un risque économique qui, s'il vient à se manifester, est susceptible d'entraîner des conséquences majeures pour l'ensemble de l'économie et pas seulement pour les agents économiques (individus ou entreprises) qui sont directement concernés par l'impact initial de la défaillance, qu'elle soit financière ou d'un autre ordre.⁸ L'analyse économique réserve en

⁷Cette prime de risque est au premier ordre proportionnelle à la variance du gain pour la loi de probabilité moyenne, comme dans le modèle usuel de choix dans l'incertain.

⁸Barrieu et Loubergé (2009) observent que la crainte d'une survenance simultanée d'une catastrophe à grande échelle (qu'il s'agisse de risque naturel, industriel, sanitaire ou terroriste) et d'un retournement à la baisse des marchés financiers réduit l'attractivité des

général le qualificatif "systémique" à des risques financiers entraînant, à la suite de la défaillance de grandes institutions financières et par le jeu des effets de contagion, une fragilisation générale du système de crédit marquée par la défiance générale des épargnants, la restriction de l'offre de crédit (credit crunch), une course vers la liquidité et une réticence des investisseurs envers le financement des actifs réels. La faillite d'institutions financières de grande taille constitue la forme extrême d'une crise financière systémique, ainsi que l'ont illustré les cas de Northern Rock, Lehman Brothers et AIG lors de la crise des subprimes.

Le caractère systémique d'une crise financière comme la crise des années 1930 ou la crise actuelle tient à l'ampleur de ses conséquences sur le secteur réel : chute des investissements, baisse de la croissance et hausse du chômage, recapitalisations bancaires impliquant les budgets publics sont les manifestations de cette transformation d'une crise qui initialement se manifeste chez certains acteurs les plus exposés, s'étend ensuite à l'ensemble du secteur financier et, de ce fait, a pour conséquence une détérioration de l'activité réelle, au delà de conséquences de nature purement financière et avec des effets démultipliés sur le bien-être social.

Cette nature systémique de la crise financière actuelle (où la crise des dettes souveraines a pris le relais de la crise des subprimes) a conduit les autorités internationales de régulation bancaire à donner une importance toute particulière à la régulation du risque systémique, en imposant de nouvelles contraintes aux principales institutions financières. Nous pouvons partir de la définition donnée dans un rapport aux ministres des finances et gouverneurs de banques centrales du G-20 :

"Establishing what constitutes systemic importance has proved difficult, and most G-20 members do not have a formal definition. Nonetheless, in practice G-20 members consider an institution, market or instrument as systemic if its failure or malfunction causes widespread distress, either as direct

cat-bonds pour les investisseurs. Bien qu'on n'ait pas observé historiquement de corrélation entre les événements catastrophiques et les rendements sur les marchés financiers, rien ne dit que cette situation va se prolonger, comme le montre la période récente. L'ouragan Katrina a provoqué des perturbations sur le cours des actions des sociétés d'assurance et aussi sur d'autres valeurs et la catastrophe de Fukushima impactera durablement l'économie japonaise; voir Jaussaud-Martine-Rey (2012). Barrieu et Loubergé (2009) soutiennent l'idée que le marché des cat-bonds pourrait se développer avec des titres hybrides, protégeant les émetteurs simultanément contre un événement catastrophiques et une forte baisse des cours boursiers.

impact or as a trigger for broader contagion. The interpretation, however, is nuanced in that some authorities focus on the impact on the *financial system*, while others consider the ultimate impact on the *real economy* as key... [A systemic event] is the disruption to the flow of financial services that is (i) caused by an impairment of all or parts of the financial system; and (ii) has the potential to have serious negative consequences for the real economy".⁹

Ce lien entre des défaillances de certains établissements financiers d'une part et la situation de l'ensemble du système financier et de l'économie réelle par le jeu des mécanismes d'entraînement est la caractéristique d'une crise systémique. Elle a conduit le Comité de Bâle sur le contrôle bancaire à donner à la régulation du risque systémique une place fondamentale dans la nouvelle réglementation bancaire dite Bâle III, dont l'objectif est "to improve the banking sector's ability to absorb shocks arising from financial and economics stress, whatever the source, thus reducing the risk of spillover from the financial sector to the real economy". Le Comité de Bâle part du constat que la gravité de la crise bancaire actuelle est due à une inadéquation de la structure et de la qualité du capital détenue par les banques, particulièrement celles ayant une activité internationale. Cela conduit à une exigence de meilleure qualité des fonds propres des banques en vue d'acquiescer leur capacité à supporter des chocs macroéconomiques. Ceci passe par des contraintes sur la structure des actifs détenus par les banques (Tier 1 notamment)¹⁰ et implique aussi une plus grande transparence et une harmonisation entre pays. Si les accords de Bâle III ne modifient pas le ratio de fonds propres qui était exigés jusqu'alors (8% des actifs pondérés en fonction des risques¹¹), ils imposent des changements qualitatifs sur la structure des fonds propres et mettent en place des "matelas" au delà du ratio réglementaire : la ratio de solvabilité Core Tier 1 passe de 2% à 4.5% et le ratio de solvabilité Tier 1 passe de 4% à 6%.¹² Bâle III instaure aussi un matelas de précaution composé de fonds propres Core Tier 1 de 2.5% alimenté en période de croissance

⁹Voir : *Guidance to Assess the Systemic Importance of Financial Institutions, Markets and Instruments : Initial Considerations. background paper. Report to the G-20 Finance Ministers and Central Bank Governors*. Financial Stability Board, International Monetary Fund, Bank for International Settlements, October 2009.

¹⁰Voir Basel Committee on Banking Supervision (2010, 2011)

¹¹Risques de crédit, risque de marché et risques opérationnels.

¹²Le Core Tier 1 (Common Equity Tier 1) comprend principalement la valeur des actions émises par les banques ainsi que les réserves accumulées. Le Tier 1 comprend le Core Tier 1 et d'autres sources de capital comme la dette subordonnée.

et utilisé en période de crise pour éponger les pertes sans toucher aux fonds propres de base, ainsi qu'un matelas contracyclique, également composé de fonds propres Core Tier 1 et susceptible de varier de 0.25% à 2.5%, visant à se prémunir du risque systémique associé à un emballement de l'offre de crédit. Au total, du fait de ces matelas, le niveau de fonds propres exigé pourra donc grimper jusqu'à 13% de la valeur des actifs pondérés par le risque.

D'autre part, la nouvelle régulation est marquée par la mise en place de ratios de liquidité, notamment le Liquidity Coverage Ratio ou LCR pour les banques internationales. Le LCR est un ratio à un mois qui vise à permettre aux banques de résister à des crises de liquidité aiguës sur une durée d'un mois.¹³ Bâle III introduit aussi le Net Stable Funding Ratio (NSFR) qui vise à réguler les difficultés spécifiques d'une banque sur une durée d'un an en imposant une adéquation suffisante entre la structure de maturité des actifs et des engagements.

Les besoins de capitaux des banques européennes pour respecter ces nouvelles normes a été évalué par l'Autorité Bancaire Européenne (ABE, 2011) à 114.7 milliards d'euros, dont 7.3 pour les banques françaises. Ceci peut passer soit par des mesures directes visant à accroître le capital (émission d'action, de dette subordonnée ou de titres hybrides), soit par une réduction de la taille du bilan en cédant des actifs ou des participations.¹⁴

Provisionner le risque d'accident nucléaire peut passer par des mécanismes divers. La Cour des Comptes (2012), dans son rapport sur les coûts de la filière électronucléaire, évalue sommairement le coût de constitution d'un fonds d'indemnisation de 70 Md€ étalée sur une durée de 40 ans. C'est une

¹³D'après le principe du LCR, les réserves de liquidité (notamment le cash et les titres d'État liquides et éligibles au refinancement en Banque Centrale ou, sous certaines réserves, d'autres actifs liquides sous 30 jours) doivent être supérieures aux fuites de liquidité qui peuvent être causées par la perte des possibilités de refinancement sur le marché, par la fuite des dépôts, et par une série d'autres facteurs qui peuvent advenir lors d'une crise de liquidité (tirages de lignes hors-bilan, fuite de liquidité liée aux collatéraux...). Deux catégories d'actifs sont considérés : le niveau 1 (cash, réserves disponibles dans les banques centrales, titres de dette souveraine sous certaines restriction...) qui peuvent être prises en compte sans restriction dans la réserve de liquidité, et le niveau 2 qui ne peut représenter plus de 40% des réserves de liquidité et qui rassemble des actifs liquides évalués avec application d'une moins-value d'au moins 15%.

¹⁴Les banques françaises ont privilégié la réduction des dividendes (aucun dividende versé par la SG et le Crédit Agricole pour 2011, réduction du taux de distribution des dividendes de 32% à 25% pour BNPP) et la cession d'activité et de portefeuille de prêts (conduisant à une réduction d'environ 10% de la taille des bilans en 2011 de BNPP, SG et Crédit Agricole). Voir : Finance & Stratégie : <http://finance.sia-partners.com>.

manière extrêmement conservatrice d'évaluer le coût économique du risque nucléaire. Comme nous l'avons rappelé, les grandes catastrophes nucléaires ont eu des coûts (très imparfaitement connus à ce jour pour la catastrophe de Fukushima) dont les ordres de grandeur se rapprochent davantage des coûts supportés par les budgets publics pour le sauvetage de grandes banques internationales que de l'hypothèse envisagée par la Cour des Comptes. Exiger des opérateurs nucléaires qu'ils satisfassent à des conditions de fonds propres plus contraignantes, de manière analogue à ce qui est dorénavant imposé aux banques, permettrait d'internaliser le coût du risque d'une manière plus efficace et plus incitative. Définir ces exigences de fonds propres en fonction de la situation concrète des opérateurs et des scénarios envisagés créerait des problèmes de coordination internationale de grande ampleur, comme cela a été et sera encore le cas pour la régulation bancaire internationale.

6 Référence

Arrow, K. J. et R.C. Lind (1970), "Uncertainty and the evaluation of public investment decisions", *American Economic Review*, 60, 3:364-378.

Bantwal, V. et H. Kunreuther (2000), "A cat-bond premium puzzle", *Journal of Psychology and Financial Markets*, 1:76-91.

Barrieu, P. et H. Loubergé (2009), "Hybrid cat-bonds", *Journal of Risk and Insurance*, 76, 3: 547-578.

Cabantous, L. (2007), "Ambiguity aversion in the field of insurance : insurers' attitude to imprecise and conflicting probability estimates", *Theory and Decision*, 62:219-240.

Cabantous, L, D. Hilton, H. Kunreuther and E. Michel-Kerjan (2011), "Is imprecise knowledge better than conflicting expertises ? Evidence from insurers' decisions in the United States ", *Journal of Risk and Uncertainty*, 42: 211-232.

Cour des Comptes (2012), *Les Coûts de la Filière Electronucléaire*, Rapport public thématique.

Cummins, J.D., D. Lalonde, R.D. Phillips (2004), "The basis risk of catastrophic-loss index securities", *Journal of Financial Economics*, 71:77-111.

Dieckmann, S. (2008), "By force of nature : explaining the yield spread on catastrophe bonds", Working Paper, Wharton School, University of Pennsylvania, Philadelphia.

Dreicer, M., V. Tort et P. Manen (1995), *Estimation of Physical Impacts and Monetary Valuation of Priority Pathways, Nuclear Fuel Cycle*, CEPN Report R-234.

Eeckhoudt, L., C. Schieber et T. Schneider (2000), "Risk aversion and the external cost of a nuclear accident", *Journal of Environmental Management*, 58: 109-117.

Froot, K. (1999), Introduction, in *The Financing of Catastrophe Risk* (K. Froot, Ed), University of Chicago Press, Chicago, 1-22.

Gollier, C. (2007), " Comment intégrer le risque dans le calcul économique", *Revue d'Economie Politique*, 117:209-223.

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (2007), *Examen de la Méthode d'Analyse Coût-Bénéfice pour la Sûreté*, Rapport DSR N°157.

Jaussaud, J., J. Martine et S. Rey (2012), "Japon : pistes pour l'analyse des conséquences économiques et managériales du grand tremblement de terre

du 11 mars 2011", CATT Working Paper N°9, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Klibanoff, P., M. Marinacci et S. Mukerji (2005), "A smooth model of decision making under ambiguity", *Econometrica*, 73, 6:1849-1892.

Kunreuther, H., J.bMeszaros, R.M. Hogart et M. Spranca (1995), "Ambiguity and underwriter decision processes", *Journal of Economic Behavior and Organization*, 26, 3:337-352.

Maccheroni, F, M. Marinacci et D. Ruffino (2012), "Alpha as ambiguity : robust mean-variance portfolio analysis", Midwest Finance Association 2012 Annual Meetings Paper, <http://ssrn/abstract=1571620>.

Nordhaus, W.D. (2008), *A Question of Balance : Weighting the Options on Global Warming Policies*, New Haven, C.T.: Yale University Press.

Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change : The Stern Review*, Cambridge University Press.

Zhu, W. (2011), "Ambiguity aversion and an intertemporal equilibrium model of catastrophe-linked securities pricing", *Insurance : Mathematics and Economics*, 49, 38-46.