

Rapport final

Juin 2007

**Energie nucléaire :
Gestion des risques et impacts socio-économiques**

Coordonnées du laboratoire porteur du projet

Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (BETA)
UMR 7522 du CNRS
Pôle Européen de Gestion et d'Economie
61 Avenue de la Forêt-Noire
67085 Strasbourg CEDEX
Tél. : 03 90 24 20 69 (secrétariat), Fax : 03 90 24 20 71
E-mail : spaeter@cournot.u-strasbg.fr

Responsable scientifique : Sandrine Spaeter

Durée du projet : 18 mois + 6 mois (prolongation)

Chercheurs impliqués

Professeurs

- **Johanna Etner**, économie du risque, GAINS - Université du Maine et chercheur associé à EUREQua, Paris1.
- **Eric Langlais**, économie du risque et de l'assurance, économie du droit, UFR Administration Economique et Sociale – Nancy Université.
- **Maxime Merli**, finance comportementale, finance de marché, LARGE, ULP - Strasbourg 1.
- **Sandrine Spaeter**, économie du risque et de l'assurance, gestion des grands risques, BETA – Nancy Université.

Maître de conférences habilitée à diriger des recherches

- **Meglana Jeleva**, économie du risque et de l'assurance, théorie de la décision, GAINS - Université du Maine et chercheur associé à EUREQua, Paris1.

Maîtres de conférences

- **Marie-Hélène Broihanne**, finance de marché, économie expérimentale, LARGE, ULP - Strasbourg 1.
- **Yannick Gabuthy**, négociation et résolution des conflits, économie expérimentale, BETA – Nancy Université.
- **André Schmitt**, finance de marché, gestion des risques majeurs, LARGE, ULP - Strasbourg 1.

Rappel du contexte de l'étude

Les points qui doivent être considérés dans la réflexion sur l'orientation à prendre en matière d'énergie en général et d'énergie nucléaire en particulier relèvent de préoccupations économiques et environnementales. D'abord, la production d'énergie à partir du nucléaire ne génère pas, ou peu, de gaz à effet de serre et est, en ce sens, plus respectueuse de l'environnement que la production à partir d'énergies alternatives telles que celles produites à partir de gaz ou de charbon. En ce sens, le développement du nucléaire permettrait alors de mieux faire face aux engagements de réduction des gaz à effet de serre pris dans le cadre du protocole de Kyoto en décembre 1997. Par ailleurs, les impacts ponctuels sur les eaux du fleuve ou de la mer qui refroidissent les installations, les impacts chimiques dus aux rejets des effluents et l'impact radioécologique font l'objet de contrôles réguliers et de plus en plus stricts, ce qui semble aller dans le sens d'une meilleure gestion des risques liés au nucléaire.

Rappelons encore que le fort taux d'électricité produite à partir du nucléaire permet à la France d'acquérir un avantage compétitif certain une fois le processus de retour sur investissement amorcé, le coût de production variable étant plus faible que celui des autres énergies. Le nucléaire permet également d'acquérir une certaine indépendance par rapport aux autres combustibles, comme le pétrole ou le gaz, dont l'offre mondiale et le prix subissent d'importantes fluctuations peu prévisibles à moyen ou long terme. Le fait que les ressources non renouvelables soient limitées relance encore la question de l'indépendance énergétique et du développement du nucléaire, aux côtés des énergies renouvelables. Une fois les investissements réalisés, le nucléaire semble également offrir une stabilité des prix appréciable.

Toutefois, si la production d'énergie nucléaire est propre, les déchets qu'elle génère sont particulièrement dangereux. Si leur traitement, leur transport et leur stockage ne sont pas strictement encadrés, les risques pour la société actuelle et pour les générations futures peuvent, à eux seuls, justifier l'abandon du nucléaire. Ce point ne se réfère pas au débat écologique mais à une analyse socio-économique dans laquelle les conséquences d'une catastrophe ne pourraient jamais être compensées par sa faible probabilité de réalisation. Dans ce contexte, les risques d'accident, d'exposition au rayonnement, à la radio-toxicité des combustibles irradiés et des matériaux qui interviennent dans la constitution des réacteurs ainsi que les risques liés à un mauvais stockage des déchets ne sont pas toujours considérés de manière objective par les agents économiques (riverains de centrales, ménages en général, mais également industriels). Plusieurs rapports mettent en effet en avant que le public a souvent une perception erronée des risques, erronée au sens où ils n'ont pas toute l'information quant aux types de risques existants et quant à leur gestion. De là découle presque immédiatement un problème d'acceptabilité (ou de rejet) de l'énergie nucléaire sur la base des enjeux véritables et non uniquement de croyances subjectives que les agents construisent à partir d'une information limitée. La prise en compte de cet aspect lié au comportement microéconomique des agents est primordiale si la France veut réunir toutes les conditions d'un développement efficace et en phase avec le développement durable de l'énergie nucléaire.

Aux côtés de la perception du risque, la question de son assurabilité est tout aussi importante, surtout parce que l'on parle ici de risques fortement corrélés entre les agents. En cas d'accident suffisamment grave pour mettre des individus en péril, ce n'est pas un dossier sinistre qu'une compagnie d'assurance aurait à examiner mais des milliers, voire des millions. Cette corrélation rend le risque du nucléaire difficile à assurer via les mécanismes standard d'assurance (principe du transfert de risque). Aussi est-il utile de s'intéresser à d'autres manières de couvrir ce risque.

Rappel des objectifs

Dans ce contexte, le BETA a proposé de fédérer, autour de la question de la perception du risque nucléaire et de celle de sa couverture, les compétences en microéconomie de ses chercheurs, de certains collègues financiers du LARGE (Laboratoire de Recherche en Gestion et en Economie, ULP) ainsi que celles de deux autres collègues, chercheurs au GAINS de l'Université du Maine et chercheurs associés à EUREQua (Paris 1).

Le premier travail repose sur la question de la perception des risques par les agents et de l'influence de cette perception, que l'on peut modifier, sur leurs comportements (de consommation, de production, ...). Elle fait appel à la microéconomie du risque et de l'incertain, à l'économie de l'information et propose également une approche à partir de l'économie expérimentale dont l'objectif est de tester en laboratoire¹ les comportements d'agents face à différentes situations de choix risqués et de types de risques. Les résultats obtenus en laboratoire sont complémentaires à ceux présentés dans le second projet de partenariat entre le CFE et le BETA (responsable scientifique : Jean-Alain Héraud). Dans le cadre microéconomique relatif aux comportements des agents face aux risques, nous nous intéressons **dans un second travail** à la couverture des risques par l'industrie du nucléaire. A partir d'une analyse assurantielle et financière, nous abordons notamment la question des captives et de la diversification par les marchés financiers. L'idée sous-jacente à cette réflexion est que le risque nucléaire est difficilement assurable par les mécanismes standard d'assurance (transfert du risque à un assureur par exemple) pour des raisons de corrélation entre les risques des agents d'une même zone géographique (cette zone pouvant être vaste), mais aussi parce qu'il s'agit là d'un risque présentant une très faible probabilité de réalisation d'événements associés à de très grandes conséquences (catastrophes). En amont de ce travail, une analyse des législations internationales régissant l'activité nucléaire est proposée et, en particulier, le comportement des opérateurs, des assureurs et des Etats dans le cadre de ces législations est étudié.

¹ Ces expériences seront menées au sein du LEES (Laboratoire d'Economie Expérimentale de Strasbourg).

Sommaire

I. La prise en compte des facteurs psychologiques dans la perception du risque nucléaire des agents économiques

1. *Analyse théorique*

Johanna Etner, Meglena Jeleva, Eric Langlais, Sandrine Spaeter

2. *Approche par la psychologie et économie expérimentale*

Marie-Hélène Broihanne, Yannick Gabuthy, Maxime Merli

2.1. **Aspects psychologiques de l'analyse de la perception des risques du nucléaire**

a) Perception des risques et heuristiques

b) Perception du risque nucléaire : Approche psychométrique et Cultural Theory

2.2. **Economie expérimentale**

a) Problématique et littérature

b) Description de l'expérience

c) Déroulement de l'expérience et description des participants

d) Impact de l'information sur la perception des risques

e) Conclusions

II. Energie nucléaire et couverture des risques : complémentarité des approches financière et assurantielle ?

1. *L'impact des législations sur les conditions de la couverture du risque nucléaire*

André Schmitt, Sandrine Spaeter

1.1. **Le cadre législatif régissant le risque nucléaire**

a) Les Conventions internationales

b) Les plafonds de responsabilité de l'opérateur et des parties contractantes

c) Convergence des conventions internationales

d) Latitude laissée aux législations nationales quant à la responsabilité de l'opérateur

1.2. Responsabilité et prévention optimales

- a) *Le modèle*
- b) *Les résultats*
- c) *Discussion*

2. La couverture du risque nucléaire

André Schmitt, Sandrine Spaeter

2.1 Arguments assurantiels et responsabilité

- a) *Le risque moral*
- b) *L'incertitude sur les risques futurs*
- c) *Evolution de la responsabilité et faiblesse de l'offre*
- d) *Responsabilité limitée et faiblesse de la demande d'assurance*
- e) *Assurance directe ou au tiers ?*

2.2. L'assurance du risque nucléaire : Vers une complémentarité pool / captive

- a) *Stratégies de rétention du risque*
- b) *Les captives : définition et intérêts*
- c) *Complémentarité pool/captive dans le secteur nucléaire*
- d) *Couvertures alternatives*

Valorisations

II. La prise en compte des facteurs psychologiques dans la perception du risque nucléaire des agents économiques

Certaines enquêtes, en particulier de prospective, mais aussi des rapports comme celui de l'Agence pour l'Energie Nucléaire, 2002, mettent en évidence une divergence entre le risque « réel » lié à la technologie du nucléaire et la perception qu'en ont les agents économiques. Nous avons entamé l'étude des facteurs qui sont à l'origine de ces discordances et la manière dont les agents les prennent en compte dans leurs préférences. Deux approches sont retenues, l'analyse théorique et l'économie expérimentale. **La première** est nécessaire pour faire apparaître les prédictions que les nouveaux modèles théoriques permettent de générer quant au comportement attendu des individus lorsqu'ils ont la possibilité de *transformer* les probabilités d'accident annoncées par les professionnels, les politiques et/ou les scientifiques. Elle a donné lieu à l'élaboration d'un premier modèle qui permet d'obtenir des prédictions théoriques riches d'enseignement. **La seconde approche** est destinée à avancer dans la réflexion sur la perception des risques à partir de l'observation des comportements en laboratoire. A ce stade du travail, la réflexion a été orientée vers les aspects qui relèvent du domaine de la psychologie. Des expériences en laboratoires sont au programme de la deuxième année du partenariat.

1. Analyse théorique

Johanna Etner, Meglena Jeleva, Eric Langlais, Sandrine Spaeter

Un premier travail, qui se situe en amont des recherches de ce projet, a permis de cerner tout l'intérêt que l'on doit porter aux nouveaux modèles développés en économie de la décision et qui permettent de considérer les aspects liés à la perception différente des risques selon la classe d'agents concernée.

Ainsi, dans l'article Etner et Jeleva (2004), les déterminants de la contribution volontaire à la qualité de l'environnement sont analysés en accordant une place particulière à la perception du risque environnemental. La qualité future de l'environnement est supposée incertaine et est influencée aussi bien par la qualité actuelle que par les contributions volontaires des agents. Les préférences des agents sont représentées par le modèle d'espérance d'utilité dépendant du rang (RDEU). Ce modèle permet une bonne prise en compte de la perception du risque des agents. Ainsi, le pessimisme va se traduire par la sous-estimation des probabilités des événements favorables et une sur-estimation des probabilités des événements défavorables. Les résultats que nous obtenons montrent que le niveau de contribution des agents à la qualité environnementale est le résultat de deux effets : un effet richesse (environnementale ou financière) et un effet risque et perception du risque. Il apparaît ainsi que les effets richesse sont insuffisants pour expliquer l'implication des agents dans l'amélioration de la qualité de l'environnement (sauf niveaux extrêmes) et que le risque et l'attitude vis-à-vis du risque doivent être pris en compte.

Le modèle de décision utilisé ici pour représenter les préférences pour des couples (richesse financière, qualité de l'environnement) semble particulièrement bien adapté pour l'analyse des décisions concernant les choix énergétiques. Les différentes sources d'énergie sont en effet caractérisées d'une part par des coûts de production (affectant la richesse financière des agents) et d'autre part par des niveaux de pollution, certaine ou aléatoire, dont elles sont à l'origine.

La perception des risques apparaît ici comme un élément déterminant dans la compréhension et l'appréhension du débat énergétique. Concernant plus spécifiquement le nucléaire, les nombreuses incertitudes et croyances qui accompagnent ce type d'énergie peuvent se révéler être un frein important à son acceptation. L'identification et la perception du risque nucléaire sont ainsi devenues un enjeu majeur pour la société. Dans Etner (2006), nous analysons comment les risques associés à l'énergie nucléaire sont perçus par la population et comment ces perceptions permettent d'expliquer les décisions individuelles en matière de choix énergétique. Nous constatons que le risque nucléaire est très souvent surestimé par l'opinion publique. Aussi, la transmission d'information par les autorités publiques doit-elle se faire dans un contexte de déformation de l'information. Nous présentons une série de modèles développés à la suite d'études expérimentales permettant d'introduire les perceptions individuelles des risques et ainsi de mieux appréhender les comportements observés.

Dans le travail en cours, nous utilisons l'enseignement tiré des deux études précédemment citées pour développer un modèle de choix énergétique dépassant le contexte de l'équilibre partiel puisque nous tenons compte à la fois du secteur de la production d'un bien et des aspects liés à la consommation d'un bien produit à partir de cette énergie par des agents dont les préférences sont représentées par un modèle prenant en compte une possible déformation des probabilités.

Plus précisément, nous considérons un producteur d'un bien qui a le choix entre utiliser une énergie non renouvelable (par exemple fossile), une énergie nucléaire ou utiliser les deux énergies simultanément. Son deuxième intrant est le travail offert par les consommateurs. Chaque type d'énergie a une efficacité énergétique qui lui est propre et véhicule un risque de dommage à l'environnement. Pour les besoins de la modélisation, mais sans réduire la portée des résultats que nous obtenons, nous supposons que l'énergie fossile génère une pollution avec certitude tandis que le risque de l'énergie nucléaire est non dégénéré et lié à la production et au stockage de déchets qui peuvent créer des dommages à la société dans le futur. La somme des deux effets crée l'effet total de la production d'énergie sur l'état de l'environnement.

Pour tenir compte de la dynamique existant entre la consommation d'énergie aujourd'hui et le risque de dissémination des déchets dans le futur ainsi que de l'épuisement possible des ressources non renouvelables, nous considérons une modélisation intertemporelle.

Chaque type d'énergie a un coût de production positif et l'énergie fossile est également sujette à une contrainte intertemporelle de capacité. Ceci nous amène à considérer un coût variable du nucléaire linéaire dans sa production tandis que le coût de production de l'énergie fossile est croissante et convexe, reflétant ainsi la contrainte d'épuisement. Le modèle peut également être traité avec une

contrainte d'épuisement de l'uranium, donc un prix unitaire non linéaire. Toutefois, suite à l'intervention de Gérard Rudolf, physicien à l'IReS de Strasbourg et spécialiste des questions liées à la production d'énergie nucléaire², il semble que la contrainte sur l'uranium ne soit pas aussi forte que celle sur l'énergie fossile. En particulier, l'énergie nucléaire doit également pouvoir être fabriquée à partir d'autres éléments, tels que le thorium par exemple.

Le producteur prend en compte dans ses décisions les mêmes caractéristiques du risque de pollution (ou d'accident) que les autorités (caractéristiques fournies par des experts), dont l'objectif est la maximisation du bien-être espéré de la société. Cet objectif est attribué à un régulateur.

Une population d'agents consommateurs est encore considérée. Dans la première version de la recherche (cf. rapport intermédiaire), elle était constituée d'agents actionnaires de l'entreprise utilisatrice d'énergie et d'agents non actionnaires (donc simples consommateurs de leur richesse initiale). Toutefois, cette différence ne s'est pas avérée pertinente dans la suite dans la mesure où les dividendes reversés aux actionnaires n'étaient pas affectés par le risque véhiculé par l'utilisation d'énergie nucléaire (externalité). Nos résultats ne sont finalement pas appauvris dans cette nouvelle version du modèle. Tous les agents consomment le bien produit à partir d'énergie et de travail et sont affectés par l'externalité négative induite par cette consommation. L'externalité totale correspond à la somme des nuisances générées par chaque source d'énergie (fossile et nucléaire). Les consommateurs ont des préférences représentées par le modèle d'utilité dépendant du rang ; autrement dit, ils peuvent déformer les probabilités objectives qui leur sont communiquées par les autorités.

Par ailleurs, nous relâchons l'hypothèse d'homogénéité des perceptions entre les agents dans cette dernière version ; en d'autres termes, la population peut maintenant être constituée à la fois d'agents pessimistes et d'agents optimistes. Dans ce contexte, nous cherchons l'optimum social et l'équilibre décentralisé.

Deux configurations ont ainsi été considérées :

a) Le producteur décide de la quantité de biens à produire et du salaire à verser, tandis que les consommateurs choisissent leurs consommations optimales et offrent leur travail. Dans ce cas, le producteur décide de produire le bien à partir des deux énergies jusqu'à ce que le bénéfice retiré à la marge de l'utilisation de chaque énergie soit égal à leur coût marginal respectif. Ce résultat est un résultat classique de la littérature économique relative à l'existence d'externalités négatives. Dans notre modèle, le producteur ne fait pas partie de la population supportant l'externalité et, de ce fait, ne l'incorpore pas naturellement dans son processus de décision. Les consommateurs prennent en considération le salaire qu'ils touchent de leur travail et décident des consommations qui maximisent leur utilité espérée transformée selon le modèle RDEU.

² Pour plus détails, cf. la liste des conférenciers invités à la fin du document)

b) Un régulateur en charge de la maximisation du bien-être social décide des quantités optimales pour la société. Ce régulateur est utilitariste : il maximise la somme pondérée des utilités des agents)³. La décision de production à partir d'énergie et de travail est maintenant centralisée. La maximisation sous contraintes de capacité et de positivité des quantités d'énergie utilisées de la somme pondérée des utilités des agents aboutit à une condition d'optimalité qui comporte trois éléments : un coût marginal financier (lié au coût de desserrement de la contrainte intertemporelle de capacité), un coût psychologique transformé, relatif à la présence du risque nucléaire et un différentiel de risque attendu, qui correspond à la différence entre la nuisance certaine due à l'utilisation d'énergie fossile et le risque attendu unitaire de l'utilisation d'énergie nucléaire. Selon l'état du stock d'énergie non renouvelable à chaque date, nous sommes en mesure de proposer les résultats suivants :

Les premiers résultats auxquels nous aboutissons sont les suivants :

1) Si la valeur attendue du risque nucléaire PERCUE par les consommateurs, donc calculée à partir de leur distribution de probabilité transformée, est toujours inférieure au niveau de pollution certain induit par la production de l'énergie fossile, cela ne suffit pas pour justifier l'abandon de l'énergie fossile. Ce résultat, surprenant de prime abord, s'explique comme suit. L'optimum social dépend à la fois de la perception que les agents ont du risque nucléaire, qui influe négativement sur leur bien-être, mais également de l'efficacité énergétique. Or, s'il est possible de produire une certaine quantité d'énergie fossile à un coût plus faible que celui dû à la production d'une certaine quantité d'énergie nucléaire, cette différence de coût peut, en théorie, contrebalancer l'effet risque. Ainsi, on peut sous ces conditions, fortes mais pas impossibles, obtenir un optimum SOCIAL avec deux solutions intérieures : une production à la fois d'énergie fossile et d'énergie nucléaire.

2) Si le risque attendu de l'utilisation du nucléaire (traitement et stockage des déchets compris) est supérieur à la pollution due à l'utilisation de l'énergie, dans ce cas les résultats ne sont pas aussi immédiats ; A ce stade de l'analyse, nous avons mis en évidence différentes situations possibles qui mettent toujours en jeu la perception des risques par les agents à travers la forme de leur fonction de transformation de probabilités et le coût psychologique dû à la présence de risque. Ce coût psychologique existe également lorsqu'on considère un critère de décision standard (Von Neumann et Morgenstern (VNM) par exemple). Il est positif dès lors que l'agent a une fonction d'utilité concave. En revanche, il est également affecté par la distribution du risque. Ainsi, si l'agent transforme la distribution objective, il ne supporte pas le même coût psychologique lié à la présence de risque qu'un agent ayant une fonction de transformation différente de la sienne.

Dans la seconde partie de ce travail, nous avons également avancé sur la question de l'hétérogénéité dans les perceptions de risques. Sur ce point, nous avons obtenu les résultats suivants :

³ Le cas du régulateur paternaliste annoncé dans le rapport intermédiaire a finalement été abandonné car peu réaliste et discuté dans l'analyse économique.

- Un agent pessimiste au sens du modèle RDEU a un coût psychologique (représenté par le ratio de la covariance entre l'utilité marginale et le risque nucléaire sur l'espérance de l'utilité marginale de la pollution) supérieur à celui d'un agent VNM ayant la même fonction d'utilité. Ce résultat n'est pas aussi immédiat qu'il n'y paraît. En effet, le pessimisme est un concept différent de celui de l'aversion au risque. Ce dernier signifie qu'un agent n'aime pas le risque et est prêt à payer pour s'en débarrasser, tandis que le pessimisme reflète une « méfiance » par rapport à une information donnée sur la distribution. Le pessimisme se traduit par une déformation de la distribution selon les croyances propres de l'individu.
- Nous montrons également que le coût psychologique perçu (donc calculé avec la distribution transformée) augmente avec le degré de pessimisme.

Une autre possibilité que nous avons commencé à étudier était de considérer une approche relevant de l'économie publique. Dans ce cas, la condition qui détermine l'équilibre est une condition entre la propension à payer des agents pour aller vers le nucléaire et l'efficacité énergétique relative. Nous avons abandonné cette approche au profit de celle privilégiant la prise en compte de l'hétérogénéité des perceptions des risques.

2. Approche par la psychologie et économie expérimentale **Marie-Hélène Broihanne, Yannick Gabuthy, Maxime Merli**

La première année a été consacrée à une revue de la littérature ainsi qu'à une étude orientée vers les aspects de la psychologie qui nous sont utiles dans la caractérisation de la perception du risque nucléaire par les agents. Cette réflexion nous a permis de cerner les points importants à tester en laboratoire. La seconde année a été consacrée à la littérature spécifique à l'économie expérimentale, à l'élaboration du protocole et des programmes expérimentaux, à l'expérience ainsi qu'à l'analyse des résultats.

L'expérience a eu lieu au LEES (Laboratoire d'Economie Expérimentale de Strasbourg). Les programmes ont été effectués par Kene Bounmy, ingénieur CNRS au BETA.

2.1. Aspects psychologiques de l'analyse de la perception des risques du nucléaire

L'objectif de cette partie est de dresser un premier bilan du point de vue de la psychologie sur la perception des risques en général et du risque nucléaire en particulier. Il est important de noter que cette revue de littérature ne se veut aucunement exhaustive mais devra servir de support à la mise en place d'expériences en laboratoire dans un cadre contextualisé (participants informés que l'enjeu de l'expérience porte sur le risque nucléaire). Nous pouvons souligner que quelques enquêtes sociologiques (Eurobaromètre sur les déchets radioactifs, Février, Mars 2005, par exemple) permettent également d'éclairer le chercheur sur le point de vue du citoyen sur ce type d'énergie et sur la perception des risques qui lui sont associés. Les principaux résultats de cette étude montrent,

en particulier, que les citoyens se sentent très mal informés et les réponses à diverses questions traduisent une réelle méconnaissance des risques associés à ce type de technologie (dangerosité, production, quantité de déchets, traitement des déchets). La majorité des citoyens est opposée à ce type d'énergie (55% d'opinion défavorable, 24% très défavorable) et l'on peut souligner que, même si cette énergie n'émettait aucun déchet, seuls 25% des citoyens changeraient d'avis. Quelques arguments semblent cependant obtenir un consentement majoritaire dans la population, c'est le cas de la diversification des sources (62%), de la réduction de la dépendance au pétrole (61%) ou encore de la réduction de l'effet de serre (62%). En outre, cette étude met en lumière l'influence importante de facteurs socio-économiques (sexe, niveau de revenu, niveau d'étude) sur l'adhésion à ce type d'énergie. Même si l'approche sociologique n'est pas au cœur de nos préoccupations, ce type de résultats (manque d'information, opinion majoritairement défavorable, appartenance sociale, ..) peut trouver une place dans les traitements expérimentaux de ce problème.

Les psychologues ont, quant à eux, depuis longtemps tenté de cerner le comportement des individus face au risque. Ces travaux émanent majoritairement de la psychologie cognitive et soulignent le comportement non parfaitement rationnel des individus lorsqu'ils sont confrontés à des choix risqués. En d'autres termes, même lorsque les probabilités de réalisation et leurs conséquences sont parfaitement connues, les choix des individus sont très éloignés de ce que prédit la rationalité parfaite. La section qui suit permet d'éclairer ces propos par quelques exemples et l'on peut se référer à des ouvrages complets pour davantage de précisions (Gilovich, Griffin et Kahneman 2002, *Heuristics and Biases : The Psychology of Intuitive Judgement*, par exemple). La seconde section souligne les principaux résultats des travaux en psychologie (psychométrie, en particulier) sur le risque perçu par les individus de l'énergie nucléaire.

a) Perception des risques et heuristiques

Le point central des travaux en psychologie cognitive peut être résumé comme suit : face à un choix complexe, les individus opèrent des simplifications ou des raccourcis de raisonnement.

Les décisions prises par ces derniers sont alors régies par des règles simplifiées qualifiées d'heuristiques. De nombreuses heuristiques peuvent être citées (heuristique de représentativité, d'ancrage, de disponibilité, de l'affect) et nous insisterons sur trois d'entre elles afin d'illustrer les biais induits par leur utilisation : les heuristiques de représentativité, de disponibilité et de l'affect. Les deux dernières semblent tenir une place particulière dans le cadre de la perception du risque nucléaire.

** L'heuristique de représentativité*

Cette heuristique est généralement utilisée lorsque les individus sont confrontés à des questions du type : Quelle probabilité associez-vous au fait que l'événement A soit dû au processus B ? Quelle est la probabilité qu'un objet A appartienne à un ensemble B ?

Dans un tel contexte, plus A est représentatif de B, plus la probabilité associée par les individus à ce lien est élevée. Un exemple classique de l'utilisation de cette heuristique est donné par Tversky et

Kahneman, 1982. Les participants répondent à la question après avoir lu la description du personnage de Linda.

Linda est âgée de 31 ans, célibataire, franche et très brillante. Elle est diplômée en philosophie. En tant qu'étudiante, elle était très sensible aux questions de discrimination et de justice sociale et a également participé à des manifestations anti-nucléaires. Quelle est pour vous l'affirmation la plus probable ?

- *Linda est employée de banque*

- *Linda est employée de banque et féministe*

90% des participants à cette expérience choisissent la réponse 2. Cette réponse viole un principe élémentaire de probabilités puisque la deuxième affirmation est plus contraignante que la première.

On peut noter que ce phénomène est persistant même lorsque les individus sont informés de la nature de la population initiale. L'information peut-être du type : le personnage décrit est tiré au hasard dans une population constituée à 70% d'avocats et à 30% d'ingénieurs. Les réponses ne sont alors aucunement affectées par les proportions initiales d'avocats et d'ingénieurs (seule compte la représentativité de la description). On peut souligner que la taille de l'échantillon initial est négligée par les participants. Si l'on formule le problème suivant :

Deux hôpitaux sont présents dans une ville : un grand (A) et un petit (B). Dans le grand, 45 bébés sont nés chaque jour contre 15 dans le petit. Certains jours le % de nourrissons qui sont des garçons est plus élevé et d'autres plus faible. Sur une période d'1 an, chaque hôpital a enregistré les jours où la proportion de garçons nés est supérieure à 60%. Dans quel hôpital pensez-vous que ce nombre de jours soit le plus élevé ?

1) *Le plus grand des deux hôpitaux*

2) *Le plus petit des deux hôpitaux*

3) *Aucun des deux*

Les individus choisissent majoritairement la réponse 3 (55,8%, 22,1% pour 1 et 22,1% pour 2). Après calcul, on peut noter qu'il y a 40 jours pendant lesquels la proportion de garçons est supérieure à 60% dans l'hôpital A alors qu'il y en aura près de 110 dans l'hôpital B. Un autre biais devenu classique et lié à l'utilisation de l'heuristique de représentativité est nommé la "Loi des petits nombres" (Tversky et Kahneman, 1971). L'expérience est la suivante :

Imaginez un dé à 6 faces, parfaitement équilibré, dont 2 faces sont vertes et 4 faces sont rouges. Le dé sera jeté 20 fois de suite et la séquence de verts et de rouges sera enregistrée. Vous devez choisir une séquence parmi trois et vous gagnez 25\$ si la séquence choisie apparaît lors des tirages successifs. Les trois séquences sont

1) *RVRRR*

2) *VRVRRR*

3) *VRRRRR*

Dans 65% des cas, le choix des individus porte sur la réponse 2 ce qui évidemment est intrigant puisque la séquence 1 est incluse dans 2 et que sa réalisation est de ce fait plus probable. La série 2 est majoritairement choisie car elle semble, pour les individus, plus « représentative » du dé utilisé. D'un point de vue général, les individus rejettent le caractère aléatoire d'une série lors de résultats identiques ; il semble évident que le nombre de jets très faibles ne permet pas ce type de conclusion.

** L'heuristique de disponibilité*

Selon Tversky et Kahneman (1974) l'heuristique de disponibilité est un principe par lequel les individus évaluent la fréquence d'une classe ou la probabilité associée à un événement en fonction de la facilité avec laquelle les exemples d'un tel événement leur viennent à l'esprit.

L'expérience suivante (Tversky et Kahneman, 1973) illustre leur propos. La question posée aux participants est la suivante :

Dans un échantillon aléatoire de textes en langue anglaise, est-il plus probable qu'un mot commence par la lettre K ou que K soit en troisième position (exclusion faite des mots de moins de trois lettres) ?

La majorité des participants pense que les mots commençant par la lettre K sont les plus nombreux (dans les faits, les mots avec K en 3ème position sont les plus nombreux). Ce résultat est, selon les auteurs, dû au fait que les mots commençant par K viennent plus facilement à l'esprit des participants.

Une autre expérience souligne d'avantage encore ce résultat, la question est la suivante (Plous, 1985) :

Quelle est la cause la plus probable de décès aux EU ?

A : Victime de débris d'avion

B : Attaque de requin

Les sujets choisissent majoritairement B alors que, sur données 1990, la probabilité liée à l'événement A est 30 fois supérieure à celle associée à B. On peut noter que les résultats sont identiques sur des comparaisons du type diabète / homicide ou encore cancer de l'estomac / accident de voiture.

Dans un tel contexte, un accident grave de type Tchernobyl n'est pas neutre dans l'évaluation par les citoyens de ce type d'événements, même de longues années plus tard.

** L'heuristique de l'affect*

Dans cette approche le risque est vu comme un sentiment (Loewenstein et al., 2001). L'idée est très intuitive : ce que ressent l'individu par rapport à la « source » du risque influence l'évaluation de ce risque. L'ampleur de la réaction est alors avant tout affective. La méthode utilisée est celle dite d'associations continues d'images. Par cette méthode ont été étudiées, par exemple, la perception de mort violente (Johnson et Tversky, 1983) ou encore la perception des risques associés au site de retraitement des déchets (Slovic et al., 1991). La procédure classique est la suivante. Dans un premier temps, il est demandé aux participants d'associer une image au concept étudié (déchets nucléaires, par exemple). Dans un second temps, les individus notent ces images sur une échelle

(très négatif à très positif). Le résultat montre que la nature des images influence le vote en faveur du site de retraitement. Plus précisément, 90% des individus dont la première image est négative votent contre (50% pour les autres). Le lien entre perception du risque et affect peut également être souligné (Alhakami et Slovic, 1994). Même lorsque le risque d'une activité et le bénéfice qui lui est associé sont positivement corrélés dans la réalité, cette corrélation est perçue comme négative dans l'esprit des individus (évaluation affective du couple risque / bénéfice). Si l'évaluation affective est favorable, la corrélation est alors perçue comme négative. Ce constat est confirmé pour le risque nucléaire (Finucane et al. 2000). La perception du risque lié à l'activité nucléaire semble également très influencée par l'« attitude » envers cette énergie (Viklund, 2004). Sur données suédoises, le modèle à trois facteurs proposé par Sjöberg, en 2000 donne de bons résultats. Les trois facteurs retenus sont la sensibilité au risque, l'affect et la crainte spécifique associée à cette énergie (*radiation*). Un dernier point mérite d'être souligné, le risque nucléaire est-il perçu comme un risque collectif ou individuel ? D'un point de vue général, les individus ont tendance à percevoir plus fortement les risques comme généraux plutôt que personnels. L'optimisme, la sur confiance ou le déni du risque (*Risk Denial*) peuvent être à l'origine de ce résultat. Dans une étude récente, Viklund (2004) montre que le nucléaire semble jugé aussi risqué pour eux que pour la collectivité.

b) Perception du risque nucléaire : Approche psychométrique et Cultural Theory

** Risque nucléaire : Approche psychométrique*

Cette méthode tente de mettre en lumière les facteurs influençant le risque perçu par les individus. Depuis les travaux de Fischhoff et al. (1978), celle-ci, fondée techniquement sur une approche de type « analyse factorielle », a été appliquée à l'analyse de nombreux risques et en particulier du risque nucléaire. Généralement cette approche met en lumière deux dimensions importantes dans la perception du risque : un facteur de crainte et un facteur de nouveauté.

Par « facteur de crainte » on entend le manque de contrôle, le sentiment de crainte, la perception de catastrophe potentielle et le rapport risque / bénéfice. Le « facteur de nouveauté » quant à lui traduit la méconnaissance du risque pris, le caractère non observable de ce risque et la présence de longs délais pour les impacts « nocifs » associés à ce dernier.

On peut souligner que les deux facteurs sont très significatifs dans le cas du risque nucléaire et ce constat offre une explication potentielle de l'opposition des individus à ce type d'énergie (Slovic, 1987). Une étude récente sur données suédoises (Sjöberg, 2000) s'appuie sur un nombre de facteurs plus importants. Des facteurs classiques sont utilisés (Nouveauté, Crainte, Nombre d'exposition) et un facteur supplémentaire qui s'avère significatif sur données agrégées a trait au caractère « moral » du risque étudié (Risque immoral, Risque non naturel, arrogance humaine). On peut toutefois souligner que sur données individuelles ce modèle offre une faible explication de la variance (20 à 30%).

* *Risque nucléaire et Cultural Theory*

Dans cette approche la perception du risque par les individus est liée à des prédispositions que l'on pourrait qualifier de « vision du monde » (Dake 1991, 1992).

Cette vision du monde est conditionnée par la relation des individus aux groupes et par la vision des contraintes qu'il faut leur imposer. Le tableau suivant offre une vision synthétique de cette approche. Quatre types se distinguent en fonction de leur orientation ou non vers le groupe ainsi que de leur prédisposition à l'imposition de règles plus ou moins fortes.

	GROUPE (-)	GROUPE (+)
REGLE (-)	Individualistes <i>Guerre / menace pour le marché</i>	Egalitaristes <i>Technologique / environnement</i>
REGLE (+)	Fatalistes <i>Aucun</i>	Hierarchistes <i>Loi et ordre</i>

On peut souligner que cette approche essuie de nombreuses critiques (Sjöberg, 2000, Sjöberg et al, 2001) sur le point de l'appartenance à un type. Elle conduit les individus à être plus ou moins sensibles à certains risques. En guise d'illustration, le type « individualiste » est sensible à des risques pouvant entraver une menace pour le marché.

D'un point de vue théorique et concernant le risque nucléaire :

- Les « fatalistes » sont supposés accorder peu de confiance aux experts et de ce fait rejeter ce type d'énergie
- Les « Individualistes » devraient être favorables (enrichissement potentiel) à ce type d'énergie si elle n'apparaît pas comme une contrainte à leur liberté
- Les « égalitaristes » devraient s'y opposer plus fortement alors que les « hiérarchistes » devraient y être plus favorables.

Les résultats de ces études montrent que les images associées sont beaucoup plus négatives en réponse à « déchets nucléaires » pour la catégorie « égalitaristes » que pour la catégorie « hiérarchistes » ou « individualistes » (Jenkins-Smith, 1993). On peut souligner que ce type de résultats est confirmé sur le soutien à l'énergie nucléaire et que ces catégorisations et l'affect (abordé dans la partie précédente) semblent jouer la même influence sur l'acceptation du nucléaire (Peters et Slovic, 1996).

On peut encore noter d'un point de vue général et en guise de conclusion que des approches mixtes ont également été proposées (Epstein, 1994). Ici, le processus de traitement de l'information est décomposé en deux systèmes :

Un système empirique dans lequel le rôle de l'affect et des émotions est important. La réponse est ici rapide et automatique.

Un système cognitif s'appuyant sur des algorithmes et règles normatives.

Ce type de modèle intégrant à la fois des variables affectives (peur) et cognitives (probabilité, gains) semble offrir une bonne représentation du risque perçu dans les domaines de la santé et de la finance, par exemple (Holtgrave et Weber, 1993).

Références citées

- Alhakami, A. S., et Slovic, P. (1994), A Psychological study of the Inverse Relationship between Perceived Risk and Perceived Benefit, *Risk Analysis*, 14(6), 1085-1096.
- Dake, K., (1991). Orienting Disposition in Perception of Risk : An analysis of Contemporary worldviews and Cultural Biases, *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 22, 61-82.
- Dake, K., (1992). Myths of Nature : Cultural and the Social Construction of Risk, *Journal of Social Issues*, 22, 61-82.
- Epstein, S. (1994). Integration of the Cognitive and the Psychodynamic Unconscious, *American Psychologist*, 49, 709-724.
- Finucane, M. L., Alhakami, A. S., Slovic, P., and Johnson, S. M. (2000) The Affect Heuristic in Judgement of Risks and Benefits, *Journal of Behavioral Decision Making*, 13, 1-17.
- Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., et Combs, B. (1978). How Safe is Safe Enough ? A Psychometric Study of Attitude Towards Technological Risks and Benefits, *Policy Science*, 9, 127-152.
- Gilovich, T., Griffin, D., et Kahneman, D. (2002). *Heuristics and Biases : The Psychology of Intuitive Judgement*, Cambridge University Press.
- Holtgrave, D. et Weber, E. U. (1993). Dimensions of Risk Perception for Financial and Health Risk, *Risk Analysis*, 13, 553-558.
- Jenkins-Smith, H. C. (1993). *Nuclear Imagery and Regional Stigma : Testing Hypotheses of Image Acquisition and Valuation Regarding Nevada*, University of New Mexico, Institute For Public Policy, Albuquerque, NM.
- Johnson, E. J., et Tversky, A. (1983). Affect Generalization and the Perception of Risk, *Journal of Personality and Social Psychology*, 45, 20-31.
- Loewenstein, G., Weber, E., Hsee, C., and Welch, N. (2001). Risk as a feelings, *Psychological Bulletin*, 127, 267-286.
- Peters, E., et Slovic, P. (1996). The Role of Affect and Worldviews as Orienting Disposition in the Perception and Acceptance of Nuclear Power, *Journal of Applied Social Psychology*, 26, 1427 – 1453.
- Plous, S. (1993). *The Psychology of Intuitive Judgement and Decision Making*, Mc-Graw-Hill.
- Sjöberg, L. (1996). A Discussion of the Limitations of the Psychometric and Cultural Theory approaches to Risk Perception, *Radiation Protection Dosimetry*, 68, 219-225.
- Sjöberg, L. (2000). Factors in Risk Perception, *Risk Analysis*, 20(1), 1-9.
- Sjöberg, L., et Drottz-Sjöberg, B-M. (2001). Fairness, Risk and Risk Tolerance in the Siting of Nuclear waste Repository, *Journal of Risk Research*, 4, 75-101
- Slovic, P. (1987). Perception of Risk, *Science*, 236, 280-285

- Slovic, P., Layman, M., Kraus, N., Flynn, J., Chalmers, J., and Gesell, G. (1991). Perceived Risk, Stigma, and Potential Economic Impacts of High Level Nuclear Waste Repository in Nevada, Risk Analysis, 11, 683-696.
- Tversky, A., et Kahneman, D., (1982). Judgements of and by Representativeness, in *Judgement Under Uncertainty : Heuristics and Biases*, Kahneman, D., and Slovic, P., and Tversky, A., Cambridge University Press.
- Tversky, A., et Kahneman, D., (1971). The Belief of Law of Small Number, *Psychological Bulletin*, 76, 105-110.
- Tversky, A., et Kahneman, D. (1973) Availability : A Heuristic for Judging Frequency and Probability, *Cognitive Psychology*, 5, 207-232.
- Tversky, A., et Kahneman, D. (1974). Judgement Under Uncertainty : Heuristics and Biases, *Science*, 185, 1124-1130.
- Viklund, M., (2004), Energy Policy Options – From The Perspective of Public Attitudes and Risk Perceptions, *Energy Policy*, 32, 1159-1171.

2.2. Economie expérimentale

Les résultats relatifs aux comportements des agents ont fait l'objet, durant la seconde phase de ce partenariat, d'une expérimentation en laboratoire.

La méthode expérimentale permet un contrôle de certaines variables en l'absence de tout contexte dans le laboratoire. Toutefois, l'intérêt d'une expérience en situation décontextualisée par rapport à une expérience dans laquelle les sujets amenés à réagir le feront en sachant qu'ils ont des choix ou des opinions à émettre face à l'énergie nucléaire et à ses risques est particulièrement discutable lorsqu'il s'agit de perception des risques. Dans la mesure où nous souhaitons mettre en avant le fait que les agents réagissent de manière spécifique, ou non, au type du risque considéré, ici nucléaire, l'expérience doit se faire de manière contextualisée⁵.

L'expérience a eu lieu au sein du LEES (Laboratoire d'Economie Expérimentale de Strasbourg) au cours de la deuxième année du partenariat. Elle fait l'objet de la 2^{ème} partie de cette section sur l'approche psychologique et l'économie expérimentale.

a) Problématique et littérature

La lecture de la littérature relative à la perception des risques « technologiques » amène un constat important : l'absence d'analyses expérimentales traitant spécifiquement de la question de la perception individuelle du risque nucléaire. Précisément, cette littérature se distingue de notre approche à la fois du point de vue de la technologie étudiée, privilégiant l'étude de la perception des

⁵ Ceci signifie que le « vrai » vocabulaire est utilisé (risque, nucléaire, déchets, radioactivité, ...). Dans des expériences décontextualisées, le vocabulaire utilisé est un vocabulaire neutre.

risques et bénéfiques associés à l'usage des nanotechnologies ou encore biotechnologies, et de la méthode d'analyse empirique retenue. En effet, les analyses qui seront brièvement exposées ci-dessous sont menées essentiellement *via* l'usage de questionnaires effectués par téléphone et/ou courrier. Plusieurs difficultés peuvent ainsi apparaître quant à la fiabilité des résultats obtenus. En effet, le mode de communication et d'interaction utilisé ne permet pas de contrôler le contexte décisionnel du sujet testé, ce manque de contrôle ayant un impact potentiellement important sur les réponses récoltées. A titre d'exemple, lorsque le questionnaire se déroule par courrier ou téléphone, il n'est pas certain que le sujet ne consulte pas une source d'information externe afin de répondre à la question posée. De la même manière, la procédure de collecte des données ne permet pas de garantir que l'individu révèle véritablement ses préférences dans la mesure où il n'est pas explicitement incité à le faire. A cet égard, les résultats obtenus par Noussair *et al.* (2002, 2004) sont tout à fait instructifs. Les auteurs étudient l'impact de la présence d'OGM dans la composition d'un bien alimentaire sur la disposition individuelle à payer des consommateurs et mettent en évidence les insuffisances liées à l'usage de questionnaires. Ils montrent notamment que le comportement de consommation « réel » analysé expérimentalement ne traduit pas le sentiment anti-OGM exprimé dans les questionnaires effectués (dans la mesure où la disposition individuelle à payer testée expérimentalement est faiblement influencée par la présence d'OGM dans le bien considéré). En effet, l'individu n'intègre pas, dans son comportement de consommation expérimental, l'externalité négative qu'il peut générer alors qu'il l'intègre dans sa réponse aux questionnaires.

La méthodologie expérimentale consiste à simuler l'abstraction de la théorie dans le cadre « aseptisé » d'un laboratoire. A ce titre, le contrôle de l'environnement d'interaction que permet la méthode présente plusieurs avantages, pour différentes raisons : (a) l'observation des faits dans leur « environnement naturel » ne permet pas d'isoler avec précision les multiples facteurs susceptibles de les provoquer, ni de quantifier leur influence respective ; (b) certaines situations sont très difficiles à observer, soit parce qu'elles sont rares, soit parce qu'elles nécessitent une combinaison particulière de facteurs ; (c) certaines situations économiques ne sont observables qu'à la condition que certaines politiques publiques soient mises en œuvre. L'expérimentation permet alors de provoquer ces situations et d'en observer les conséquences, constituant ainsi un outil puissant de réfutation des modèles théoriques, d'étude du comportement économique et d'aide à la décision. A titre d'exemple, Alvin Roth a mobilisé la méthode expérimentale dans le but d'aider à améliorer l'efficacité du marché des internes en médecine aux Etats-Unis (Roth et Peranson, 1999). L'économie expérimentale est également mobilisée par les centres de recherche d'IBM (« T.J. Watson Research Center ») ou de Hewlett-Packard (« Hewlett-Packard Laboratories ») pour étudier la formation des prix, l'apprentissage stratégique, les procédures de négociation ou encore les dynamiques d'information sur les marchés. Cet intérêt croissant et les insuffisances des méthodes précédemment explicitées justifient pleinement le recours à l'outil expérimental dans notre analyse.

* *La perception des risques et des bénéfices associés aux nouvelles technologies : le rôle de l'effet de contexte*

Le développement de la littérature empirique relative à l'appréciation des nouvelles technologies se fonde sur un constat mis en évidence dans de nombreuses études : une activité jugée attractive par l'individu sera également considérée comme peu risquée par ce dernier (Alhakami et Slovic, 1994 ; McDaniels *et al.* 1997). Fort de ce constat, l'objectif de cette littérature est double. Il s'agit, d'une part, de démontrer l'existence de cette corrélation négative entre la perception des risques et celle des bénéfices associés au développement de nouvelles technologies et, d'autre part, d'en étudier les facteurs explicatifs.

Finucane *et al.* (2000) s'intéressent à trois technologies différentes, à savoir l'énergie nucléaire, le gaz naturel et les conservateurs alimentaires, et confirment l'existence de cette corrélation. De manière générale, les résultats montrent que la modification, *via* l'information transmise aux sujets durant l'expérience, d'un attribut de la technologie (par exemple, ses bénéfices potentiels) altère l'appréciation globale que peut avoir l'individu de cette technologie et donc le jugement qu'il exprime vis-à-vis de ses autres attributs (par exemple, le risque associé à l'usage de cette technologie)⁶. En outre, les auteurs montrent que cette corrélation négative est partiellement liée à une forme de rationalité limitée des individus. En effet, cette relation entre la perception des risques et celle des bénéfices est beaucoup moins forte lorsque les personnes interrogées se voient imposer une durée limitée dans leur temps de réponse, diminuant ainsi artificiellement leurs capacités cognitives et de raisonnement analytique. Par ailleurs, cette corrélation négative, confirmée par l'analyse de Gaskell *et al.* (2004) relative au développement des OGM, montre que l'élément déterminant dans le jugement de l'individu est l'intérêt qu'il perçoit dans l'utilisation de la technologie, alors même que les pouvoirs publics cherchent souvent à communiquer exclusivement sur la faiblesse des risques associés à cette utilisation. A cet égard, le rejet des OGM en Europe, mis en évidence dans l'Eurobaromètre d'avril 2000, proviendrait du fait que la population ne perçoit pas clairement les bénéfices potentiels d'une telle innovation⁷. Les auteurs prennent ainsi l'exemple du téléphone portable dont l'usage est largement répandu et le succès commercial indéniable alors même que les risques potentiels en termes de santé sont avérés.

Ces conclusions doivent cependant être mitigées dans la mesure où les résultats dépendent du type de technologie considérée. En effet, Cobb (2005) et Wiedemann et Schutz (2006) montrent que l'existence d'une corrélation négative entre la perception des risques et celle des bénéfices n'est pas confirmée lorsque l'on s'intéresse aux nanotechnologies⁸, que l'on considère les bénéfices

⁶ Il est à noter que le panel d'individus retenus dans cette étude n'est pas représentatif de la population (78% de femmes, âge moyen : 19 ans), ce qui peut artificiellement biaiser les résultats. La surreprésentation des femmes tend notamment à rendre le panel plutôt réfractaire à l'acceptation des nouvelles technologies (Savage, 1993). Cette insuffisance concerne également l'analyse de Wiedemann et Schutz (2006) présentée plus loin.

⁷ Selon cette source, seulement 46% des Européens considèrent que les OGM sont utiles.

⁸ Les nanotechnologies regroupent l'étude, la fabrication et la manipulation de structures, de dispositifs et de systèmes matériels de taille comparable à celles des molécules et des atomes. Les nanotechnologies font l'objet de critiques quant à leurs enjeux et leurs risques avérés et potentiels : dangers pour les voies respiratoires dont les effets seraient similaires à ceux de l'amiante, risques liés à une éventuelle production autonome des nanoparticules, pour ne citer que ceux-là.

économiques, environnementaux ou en termes de santé. Cependant, suivant cette étude, il apparaît que la perception individuelle des risques liés aux nanotechnologies est influencée par la taille des entreprises à l'origine du développement de cette technologie : le risque est perçu comme plus important lorsqu'il émane d'une firme multinationale. Ce résultat peut provenir d'un certain manque de confiance de la part des individus à l'égard des grands groupes industriels et révèle l'importance que peut avoir le contexte social et institutionnel de développement de la technologie dans l'appréciation qu'en aura la population en termes de risques. A cet égard, suite à un débat national sur l'énergie nucléaire en Chine, Liu et Smith (1990) montrent que l'effet de ce débat sur l'opinion chinoise a été relativement faible. Ce manque d'efficacité de la communication effectuée sur le nucléaire provient d'un déficit de confiance des citoyens vis-à-vis des experts et de leur gouvernement. Ce rôle prépondérant de la confiance dans l'acceptation d'une nouvelle technologie a été largement mis en évidence dans la littérature (Binney *et al.*, 1996 ; Siegrist, 2000 ; Slovic, 1993 ; Slovic *et al.*, 2000) et doit être intégré par les autorités concernées dans l'élaboration de leur politique de communication. La manière dont la technologie est « présentée » au grand public est primordiale dans la perception qu'il aura des risques et bénéfices associés à son développement.

Ces éléments renvoient clairement à la notion « d'effet de contexte » (*framing effect*⁹) mis initialement en évidence dans les travaux de Tversky et Kahneman (1981). Selon les auteurs, il est possible de sélectionner et mettre en avant certains éléments particuliers d'un phénomène ou d'un problème de manière à promouvoir une interprétation particulière de ce phénomène ou problème et l'adoption d'une solution préférée. Autrement dit, les individus peuvent être amenés à modifier leurs préférences selon la formulation choisie d'un même problème. L'existence de cet effet de contexte est lié, d'une part, au fait que les individus mobilisent davantage l'information directement accessible en mémoire sans rechercher des éléments plus fiables (Fiske et Taylor, 1991) et, d'autre part, au fait qu'ils ont tendance à surpondérer l'importance accordée à certaines considérations spécifiques (Nelson *et al.*, 1997). L'influence de l'information sur le comportement individuel dépend donc largement de la manière dont cette information est présentée (ou « contextualisée ») par son émetteur. Cependant, suivant les résultats de Liu et Smith (1990), il apparaît que l'importance de l'effet de contexte dépend largement de la crédibilité de cet émetteur (Zaller, 1992) et des caractéristiques du risque considéré. Slovic (1987) montre notamment que la nature du risque influence la manière dont les individus le perçoivent : plus le risque est catastrophique et l'aléa difficile à contrôler, plus l'opinion est manipulable.

Ces éléments sont au cœur de notre problématique dans la mesure où l'objectif de notre étude et de notre expérience est double. D'une part, il s'agit de déterminer s'il existe effectivement une corrélation négative entre la perception des risques et celle des bénéfices dans le contexte particulier de l'énergie nucléaire. L'étude se veut relativement désagrégée dans la mesure où nous considérons plusieurs catégories de risques (environnementaux et militaires) et de bénéfices (environnementaux et économiques). D'autre part, l'objectif est de déterminer si cette corrélation mais également

⁹ Voir Kuhberger (1998) et Levin *et al.* (1998) pour des revues de la littérature sur l'effet de contexte.

l'appréciation distincte des risques et des bénéfices sont influencés par la nature de l'institution à l'origine de l'information. Nous considérons pour cela que l'information est transmise soit par les autorités étatiques soit par une organisation non gouvernementale.

b) Description de l'expérience

L'expérience est relative à l'étude de l'impact de l'information sur la perception de risques liés au nucléaire. Compte tenu des résultats obtenus dans la littérature (cf. paragraphe a)), il apparaît nécessaire de porter une attention particulière dans trois directions.

En premier lieu, il convient d'évaluer l'impact d'une information sur la perception des conséquences du choix d'une énergie principalement nucléaire, à la fois en termes de bénéfices attendus et de risques potentiels. En effet, les résultats obtenus diffèrent dans la littérature selon que l'on interroge les individus sur les bénéfices ou sur les risques d'une même décision. En nous basant sur les travaux précédents, nous avons identifié deux catégories de bénéfices, économiques et environnementaux ; et deux catégories de risques, environnemental et autres risques (terrorisme...).

En second lieu, afin d'isoler l'impact d'une information spécifique, il est nécessaire de contrôler l'information détenue par les individus avant le déroulement de l'expérience ainsi que leur degré d'acceptabilité pour le nucléaire. Une autre technique, que nous retenons, consiste à contourner cette difficulté en évaluant la confiance des individus dans certaines affirmations relatives aux bénéfices / risques du nucléaire, avant et après réception d'information. Nous mesurons ainsi l'impact de l'information reçue comme une différence de croyances, indépendamment du niveau initial de celles-ci. En dernier lieu, l'impact d'une information est susceptible d'être différent selon l'identité de son émetteur. Nous avons choisi de proposer la même information aux sujets et de faire varier le type de son émetteur (source gouvernementale, source associative) pour évaluer et tenir compte de la confiance des individus dans l'émetteur de l'information, cette variable étant déterminante dans la littérature.

En tenant compte de ces trois éléments, l'expérience consiste à demander à des sujets en laboratoire leur degré de confiance (entre 0 et 100) dans une affirmation portant sur 4 catégories d'éléments :

- bénéfices économiques du nucléaire
- bénéfices environnementaux du nucléaire
- risques environnementaux du nucléaire
- autres risques du nucléaire

Evaluer le degré de confiance en ayant recours à cette échelle offre deux principaux avantages. En premier lieu, une telle échelle permet d'obtenir des « scores » de réponse qui seront aisément transformés en gains. Pour les détails du calcul des gains, le lecteur est invité à se référer à l'annexe.

En second lieu, cette échelle rend possible le calcul ultérieur des écarts suite à une modification du contexte. Précisément, une fois ce premier choix réalisé, on demande à nouveau aux sujets leur degré de confiance dans ces mêmes affirmations après réception d'une information portant sur l'une des quatre catégories précédentes (séquences par la suite).

Le tableau 1 résume l'architecture de l'expérience. Une première séquence portant sur des affirmations de domaines divers, non nucléaire, sert d'entraînement aux sujets. Les 4 affirmations de chacune des 5 séquences ainsi que les informations envoyées aux sujets sont présentées ensuite. Dans l'expérience, la moitié des sujets reçoit, pour chaque séquence, la même information précédée de l'une des deux entêtes, association ou Etat.

Dans l'expérience, les réponses données par les sujets sont rémunérées selon une règle les incitant au sérieux dans leur démarche (cf instructions en annexe). Des données relatives aux participants sont également collectées à la fin de l'expérience.

Séquences (k)/Type d'affirmations (j)	Générales	Bénéfices économiques du nucléaire (1)	Bénéfices environnementaux du nucléaire (2)	Risques environnementaux du nucléaire (3)	Autres risques du nucléaire (terrorisme ...) (4)
Séquence 1 (pas d'information)	4 affirmations				
Séquence 2 (Information sur les bénéfices économiques du nucléaire)		Affirmation 2,1	Affirmation 2,2	Affirmation 2,3	Affirmation 2,4
Séquence 3 (Information sur les bénéfices environnementaux du nucléaire)		Affirmation 3,1	Affirmation 3,2	Affirmation 3,3	Affirmation 3,4
Séquence 4 (Information sur les risques environnementaux du nucléaire)		Affirmation 4,1	Affirmation 4,2	Affirmation 4,3	Affirmation 4,4
Séquence 5 (Information sur les autres risques du nucléaire)		Affirmation 5,1	Affirmation 5,2	Affirmation 5,3	Affirmation 5,4

Tableau 1 : Présentation de l'expérience. Chaque affirmation est indiquée par son numéro de séquence (k) suivi du numéro correspondant à son type (j).

Présentation des séquences

Pour chaque séquence, les 4 affirmations et l'information soumises aux participants (nous précisons seulement lesquelles sont fausses) sont présentées.

SEQUENCE 1

1/ Le nombre de commissaires de la Commission Européenne est compris dans l'intervalle [18;35]
Vrai, 27

2/ La ville de Rome est la capitale de l'Italie depuis une date comprise dans l'intervalle [1180;1250].
Faux, depuis 1870

3/ Au cours de toute sa carrière, le brésilien Pelé a marqué un nombre de buts compris dans l'intervalle [1280;1350].
Vrai, 1284 buts

4/ En France métropolitaine, pour les particuliers, le prix du Kwh d'électricité est compris dans l'intervalle [0,1380€;0,1450€].
Faux, 0,1074€ ou 0,1311€ selon le compteur (tarifs au 15/08/2006)

SEQUENCE 2

2.1/ L'électricité produite en France est compétitive ce qui permet notamment d'exporter une part de la production française et de faire bénéficier aux français d'une énergie bon marché.

2.2/ Grâce au nucléaire, la France fait partie des pays d'Europe qui ont les plus faibles émissions de CO2 par habitant.

2.3/ Le principal problème environnemental de l'énergie nucléaire est la gestion des déchets radioactifs.

2.4/ Un accident tel que celui de Tchernobyl est tout à fait probable en France. FAUX

Information (précédée de l'une des deux entêtes : association ou Etat) :

« La compétitivité économique est un préalable indispensable pour qu'une technologie puisse contribuer au développement durable. Pour évaluer la compétitivité, il convient, dans l'idéal, de comparer les coûts totaux supportés par la société, et notamment les coûts sociaux et environnementaux. La plupart des centrales nucléaires en service sont compétitives sur la base des critères actuels, y compris ceux des marchés de l'électricité déréglementés, car leurs coûts marginaux de production sont faibles comparés à ceux de leurs concurrentes thermiques. Considérée du point de vue du développement durable, leur compétitivité est solide dans la mesure où la plupart des coûts sanitaires et environnementaux de l'énergie nucléaire sont déjà internalisés. En effet, les consommateurs d'électricité paient pour la sûreté nucléaire et les assurances contre les accidents nucléaires, le démantèlement des installations nucléaires et le stockage des déchets radioactifs. »

SEQUENCE 3

3.1/ Avec sa politique en faveur de l'électricité d'origine nucléaire, la France a augmenté son indépendance énergétique, elle est donc moins vulnérable à la forte volatilité des prix du pétrole ou du gaz.

3.2/ Le programme nucléaire n'a pas permis au secteur électrique de réduire ses émissions de CO2 de manière significative. FAUX

3.3/ Quasiment tous les objets qui nous entourent (y compris le corps humain) sont radioactifs.

3.4/ Le détournement des programmes électronucléaires pacifiques est un moyen possible pour des pays ou groupes désireux de se doter de l'arme nucléaire, d'acquérir les technologies, l'équipement et les matières indispensables.

Information (précédée de l'une des deux entêtes) :

« Les principaux gaz à effet de serre sont le gaz carbonique et le méthane. La combustion de combustibles fossiles a produit environ 6.4 milliards de tonnes de carbone sous forme de gaz carbonique en 1998, soit en gros une tonne par habitant de la planète, auxquels est venu s'ajouter 1 milliard de tonnes supplémentaires, si ce n'est plus, produites par la combustion des forêts. Plus de la moitié des émissions de carbone produites par les combustibles fossiles proviennent aujourd'hui des pays Membres de l'OCDE. Néanmoins, dans les décennies à venir, l'augmentation de la consommation d'énergie et, par conséquent, des émissions de carbone se situera essentiellement dans les pays non-membres. L'accroissement de la demande d'énergie pour les besoins de la production d'électricité et des transports sera particulièrement rapide en dépit de l'amélioration du rendement énergétique. Les transports continueront de consommer essentiellement du pétrole ; en revanche, pour la production d'électricité, on pourra choisir entre diverses sources d'énergie dont le charbon, le gaz naturel, l'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

Il sera important de faire appel à des sources d'énergie propres pour produire l'électricité dans les grandes villes où l'industrie et le transport feront croître la consommation des combustibles fossiles et des émissions de gaz de toutes sortes. L'électricité devrait contribuer à réduire le risque d'un changement climatique planétaire. »

SEQUENCE 4

4.1/ Les entreprises du secteur nucléaire (hors EDF¹⁰) ont un impact positif sur l'emploi en France.

¹⁰ Dans cette affirmation, l'entreprise EDF est exclue puisqu'il semble évident qu'elle contribue à la majorité du total des emplois du secteur alors qu'il n'en est pas de même pour les autres entreprises.

4.2/ Les déchets issus de l'utilisation de l'énergie nucléaire représentent une part élevée de la totalité des déchets toxiques dans les pays dotés d'un programme nucléaire. FAUX

4.3/ En termes de santé, il est prouvé que la radioactivité ne peut pas avoir d'impact sur le développement de certains cancers ni d'effets génétiques susceptibles d'affecter la descendance des personnes exposées. FAUX

4.4/ Les centrales nucléaires françaises sont dimensionnées de telle sorte qu'elles puissent faire face aux risques d'agressions externes, comme les séismes, en incluant le risque de chute accidentelle de type avions d'affaires.

Information (précédée de l'une des deux entêtes) :

« Le tableau 1 indique les doses de radioactivité naturelle à divers endroits de même que pour un certain nombre d'activités humaines, telles que la radiographie médicale et l'énergie nucléaire. Il montre que les expositions aux rayonnements naturels varient dans une large fourchette, mais sont dans tous les cas supérieures aux expositions résultant de la radioactivité artificielle. En outre, les expositions liées à des activités courantes, comme utiliser un ordinateur ou se rendre par avion à l'étranger, sont largement supérieures à celles imputables aux centrales nucléaires.

Note : Le Sievert (Sv) est l'unité de dose utilisée en radioprotection pour mesurer l'effet biologique des rayonnements ionisants. 1 microsievert (μ Sy)=1 millième de millième de Sievert.

Tableau 1. Doses provenant de diverses sources de rayonnements

Source	Dose (μ Sy/an)
Écorce terrestre (Cornouailles, Royaume-Uni)	7000
Écorce terrestre (Sydney, Australie)	160-900
Cosmologique (au niveau de la mer)	260
Radiographie médicale	200
Bâtiment d'habitation en pierre, en béton ou en briques	70
Voyage par avion (par millier de miles parcouru)	10
Terminal d'ordinateur	1
Centrale au charbon (dans un périmètre de 80 km)	0.3
Centrale nucléaire (dans un périmètre de 80 km)	0.09
Détecteur de fumée	0.08

Sources : Nuclear Energy Institute et World Nuclear Association.”

SEQUENCE 5

5.1/ L'abandon du nucléaire se traduirait par une hausse du chômage.

5.2/ Une seule grande centrale nucléaire permet de limiter l'émission de CO2 si elle est utilisée à la place du pétrole pour produire de l'énergie.

5.3/ En cas d'accident nucléaire extrême en France, l'absence d'enceintes de confinement fait que les rejets dans l'atmosphère seraient importants. FAUX

5.4/ Les Conventions de Genève ne contiennent pas d'engagements prévoyant explicitement de ne pas prendre pour cible les installations nucléaires civiles. FAUX

Information (précédée de l'une des deux entêtes) :

« La production d'électricité d'origine nucléaire présente des risques spécifiques, liés à la radioactivité des matières qu'elle consomme et qu'elle génère, mais également des risques de prolifération associés au développement de l'arme nucléaire.

Si le risque de prolifération, par nature transnational, a très vite fait l'objet de négociations au niveau international, les autres risques, que ce soient les problèmes de sûreté des installations ou ceux liés au traitement des déchets, ont été tout d'abord envisagés dans des contextes nationaux.

Le TNP (Traité de Non Prolifération) est un instrument international de lutte contre la prolifération à vocation universelle. Par ailleurs, des conventions internationales spécifiques auxquelles la France est Partie ont été négociées dans différents domaines, en particulier dans celui de la sûreté qui comprend la gestion des combustibles usés et celui des déchets radioactifs. »

ENTETES (la source, gouvernementale ou associative est mise en évidence)

En provenance d'un organisme gouvernemental officiel

« **L'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)** assure au nom de l'Etat, le contrôle du nucléaire pour protéger le public, les patients, les travailleurs et l'environnement. Elle informe les citoyens ».

En provenance d'une association

« **Greenpeace** est une association internationale non violente de défense de l'environnement qui dénonce les urgences écologiques et agit pour protéger la planète».

c) Déroulement de l'expérience et description des participants

24 individus ont participé à l'expérience. Après une lecture orale des instructions, les participants ont posé des questions relatives à l'expérience auxquelles l'expérimentateur a répondu. Un questionnaire a permis de vérifier la compréhension des instructions avant le déroulement de l'expérience à proprement parler (cf questionnaire sur les instructions en annexe). L'expérience s'est déroulée de 14H (convocation des sujets pour la lecture des instructions) à 15H30 (paiement individuel des gains).

Les participants ont été sélectionnés au hasard dans la base de données du Laboratoire d'Economie Expérimentale de Strasbourg. Leurs caractéristiques, récoltées dans le questionnaire final (cf en annexe), sont résumées dans le tableau 2 suivant :

Age	Sexe	Cursus	Niveau d'études
Moyenne : 23,71	M : 13	SHS : 9	L1 : 0
Médiane : 23	F : 11	SVT : 5	L2 : 2
Ecart-type : 3,72		ING : 5	L3 : 5
		Autres : 5	M1 : 7
			M2 : 8
			+ : 2

Tableau 2 : Caractéristiques générales des participants

En ce qui concerne les questions générales, la répartition des réponses est donnée dans le tableau 3 :

Fumeur	Chauffage	Climatisation	Habitat	Transport	Facture électricité
Oui : 5 Non : 19	Electricité : 8 Gaz naturel : 6 Charbon : 0 Fioul : 7 Energies ren. : 2 Autres : 1	<u>Voiture</u> : Oui : 7 Non : 15 NSP : 2 <u>Domicile</u> : Oui : 3 Non : 21	Ville : 21 Campagne : 3	Voiture : 5 Transport en commun : 7 Bicyclette : 8 A pied : 4	[0;30]€ : 6 [31;60]€ : 10 [61;100]€ : 7 [101;150]€ : 1 + de 150€ : 0 Ne sait pas : 0

Tableau 3 : Autres caractéristiques des participants

Enfin, sur les 24 participants, 9 sont favorables à une énergie majoritairement d'origine nucléaire, 8 sont contre et 7 ne se prononcent pas.

d) Impact de l'information sur la perception des risques

L'expérience a été conçue afin de tester l'impact d'une information sur la perception du risque. Cet impact est mesuré par la différence entre la croyance des sujets dans une affirmation avant et après réception de l'information.

On note $R_{ij,0}^k$ et $R_{ij,1}^k$ les croyances de l'individu i dans l'affirmation j , respectivement avant (0) et après (1) réception de l'information de la séquence k .

Les valeurs $R_{ij,0}^k$ présentent l'avantage de contrôler l'information et les prédispositions de chaque individu face aux questions relatives à l'énergie nucléaire. Pour chaque individu, seule la différence de croyance notée $\Delta R_{ij}^k = R_{ij,1}^k - R_{ij,0}^k$ permet de mesurer l'impact de l'information reçue. Dans l'expérience, les informations peuvent avoir un impact positif ou négatif sur les croyances ; pour tenir compte de ce phénomène, nous étudions également la différence en valeur absolue :

$$\Delta_A R_{ij}^k = |R_{ij,1}^k - R_{ij,0}^k|.$$

On calcule les moyennes de ces valeurs sur l'ensemble des participants : $\overline{\Delta R_j^k} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \Delta R_{ij}^k}{24}$ et

$$\overline{\Delta_A R_j^k} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \Delta_A R_{ij}^k}{24}.$$

Les tableaux 4 et 4bis indiquent les valeurs moyennes obtenues $\overline{\Delta R_j^k}$ et $\overline{\Delta_A R_j^k}$. Dans ces tableaux, la présence d'une étoile indique une valeur significativement différente de 0 au niveau de confiance de 5%.

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	10,2917*	6,5417*	3,0833	-9,5833*	2,5833
3	5,1250*	-4,8333	7,9583	1,7083	2,4896
4	3,6667	-11,8750*	9,3333	3,1667	1,0729
5	2,5833	0,6250	-2,8750	3,6250	0,9896
Global	5,4166	-2,3854	4,375	-0,2708	0,6250

Tableau 4 : Différences moyennes de croyances

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	14,0417*	9,0417*	3,5000	10,5833*	9,2917
3	5,5417*	11,4167*	7,9583	3,3750	7,0729
4	4,0833	13,8750*	15,1667*	4,4167	9,3854
5	12,0833*	10,9583*	16,2917*	14,0417*	13,3438
Global	8,9375	11,3229	10,7291	8,1041	9,7734

Tableau 4bis : Différences absolues moyennes de croyances

L'impact de l'information reçue est significatif dans seulement 5 cas sur 16 lorsque les différences moyennes sont calculées en valeur et dans 11 cas sur 16 lorsqu'elles sont calculées en valeur absolue. En moyenne, l'information modifie près de 10% des croyances initiales (tableau 4bis).

Les valeurs les plus fortes de ces différences de croyance se situent majoritairement sur la première diagonale du tableau (sauf pour la séquence 5)¹¹, c'est-à-dire dans les situations où l'information de la séquence porte sur une catégorie d'affirmation du même type. Par exemple, pour k=4 et j=3, l'information de la séquence 4 porte sur les risques environnementaux du nucléaire et la différence est calculée pour l'affirmation relative à ces mêmes risques. Ainsi, il apparaît que les participants utilisent d'autant plus l'information que celle-ci s'avère pertinente.

Le tableau 4bis permet également de constater qu'en moyenne, l'information portant sur les bénéfices du nucléaire (séquences 2 et 3) a moins d'impact que celle portant sur ses risques (séquences 4 et 5). Par ailleurs, les affirmations formulées en termes de bénéfices ou de risques environnementaux sont celles qui apparaissent les plus susceptibles d'être affectées par une information nouvelle. En particulier, le tableau 4 permet de constater que les participants ont une tendance naturelle à croire que le nucléaire est source de bénéfices environnementaux plutôt que de risques environnementaux car les révisions de croyances sont négatives dans le premier cas et positives dans le second. En d'autres termes, les participants ont tendance à sous-estimer les risques environnementaux et à sur-estimer les bénéfices environnementaux du nucléaire. Les bénéfices économiques du nucléaire semblent en moyenne sous-estimés, tandis que les autres risques sont sur-estimés (révisions positives et négatives des croyances).

Pour déterminer si l'impact d'une information est lié à l'identité de son émetteur, nous présentons dans les tableaux 5-5bis et 6-6bis les différences moyennes pour les sous-ensembles d'individus ayant reçu l'information en provenance de l'Etat ou d'une association. Nous ne présentons pas conjointement les résultats obtenus pour l'information en provenance d'une association ou de l'Etat car les différences entre les deux sources ne donnent pas des résultats significatifs au seuil de 5% sauf dans un cas (séquence 2 et affirmation 2).

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	14,1667*	13,5000*	4,5833	-10,0000	5,5625
3	6,2500	-13,0000	7,5000	1,7500	0,6250
4	4,0000	-12,0833	5,5833	3,0833	0,1458
5	-2,0000	-6,2500	-5,3333	8,1667	-1,3542
Global	5,6041	-4,4583	3,0833	0,75	1,2448

Tableau 5 : Différences moyennes de croyances (association)

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	15,8333*	14,3333*	5,4167	12,0000	11,8958

¹¹ On peut attribuer ce phénomène à la diversité de l'information de la séquence 5 qui traite à la fois de risques environnementaux et de problèmes de sécurité.

3	7,0833	16,1667*	7,5000	5,0833	8,9583
4	4,8333	14,4167*	17,2500*	3,0833	9,8958
5	5,3333	14,4167*	24,6667*	14,8333*	14,8125
Global	8,2708	14,8333	13,7083	8,75	11,3906

Tableau 5bis : Différences absolues moyennes de croyances (association)

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	6,4167	-0,4167	1,5833	-9,1667	-0,3958
3	4,0000	3,3333	8,4167	1,6667	4,3542
4	3,3333	-11,6667	13,0833	3,2500	2,0000
5	7,1667	7,5000	-0,4167	-0,9167	3,3333
Global	5,2292	-0,3125	5,6667	-1,2917	2,3229

Tableau 6 : Différences moyennes de croyances (Etat)

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	12,2500	3,7500	1,5833	9,1667	6,6875
3	4,0000	6,6667	8,4167	1,6667	5,1875
4	3,3333	13,3333	13,0833	5,7500	8,8750
5	18,8333	7,5000	7,9167	13,2500*	11,8750
Global	9,6042	7,8125	7,7500	7,4583	8,1563

Tableau 6bis : Différences absolues moyennes de croyances (Etat)

En premier lieu, on peut noter que les participants modifient plus fortement leurs croyances suite à une information en provenance d'une association (11,3906) que de l'Etat (8,1563). Cette apparente méfiance vis-à-vis des sources officielles doit cependant être nuancée pour deux raisons. Tout d'abord, cette différence n'est pas significative compte tenu du faible nombre de participants, et chaque participant a reçu ses informations d'une seule et même source pendant l'expérience.

Les conclusions relatives à la présence des différences les plus fortes sur la première diagonale sont à relativiser en fonction de la provenance de l'information (tableaux 5bis et 6bis). La plus forte crédibilité supposée de l'association tend à renforcer notre argument relatif à la pertinence de l'information.

De la même façon, l'information portant sur les bénéfiques du nucléaire (séquences 2 et 3) a d'autant moins d'impact que celle portant sur ses risques (séquences 4 et 5) qu'elle est en provenance de l'Etat (tableau 6bis). En effet, aucune conclusion de ce type ne peut être établie dans le tableau 5bis relatif aux informations en provenance d'une association. Les affirmations formulées en termes de bénéfiques ou de risques environnementaux sont celles qui apparaissent les plus susceptibles d'être affectées par une information nouvelle seulement dans le cas où cette information provient d'une

association. Lorsqu'elle provient de l'Etat, l'information affecte de façon identique les croyances des participants dans les différentes catégories.

Les résultats précédents ont été obtenus sur l'ensemble des variations de l'expérience, variations nulles comprises. Lorsqu'un participant ne modifie pas son choix après avoir pris connaissance d'une information cela peut signifier qu'il n'accorde aucune confiance à son émetteur ou que cette information ne modifie pas ses croyances initiales. L'analyse des données relatives à ces différences nulles de croyances est donc indispensable (tableau 7). En moyenne, dans un peu plus de la moitié des cas (12,9375) les participants ne modifient pas leurs croyances. Les situations les plus susceptibles de voir les participants conserver leurs croyances initiales sont celles pour lesquelles l'information provient de l'Etat et, dans une moindre mesure celles portant sur les risques.

k / Affirmation j	1	2	3	4	Global
2	11	13	19	15	14,5
Dont association	4	4	9	7	6
Dont Etat	7	9	10	8	8,5
3	16	13	18	20	16,75
Dont association	7	5	9	9	7,5
Dont Etat	9	8	9	11	9,25
4	8	7	9	7	7,75
Dont association	8	6	7	8	7,25
Dont Etat	10	8	10	9	9,25
5	13	13	15	10	12,75
Dont association	7	5	6	4	5,5
Dont Etat	6	8	9	6	7,25
Global	12	11,5	15,25	13	12,9375

Tableau 7 : Nombre de variations nulles

e) Conclusions

De manière générale et au regard de notre problématique initiale, les expérimentations effectuées mettent en lumière deux résultats majeurs.

D'une part, il apparaît que l'information fournie aux individus joue un rôle dans la perception que ces derniers peuvent avoir des risques et bénéfices relatifs à l'énergie nucléaire. En effet, l'information modifie globalement près de 10% des croyances initiales, avec un impact relativement plus important concernant les croyances ayant trait aux bénéfices de cette technologie. Il convient tout de même de relativiser cette influence dans la mesure où elle reste faible et centrée sur les cas où cette information concerne une affirmation du même type. Autrement dit, une information portant sur les

bénéfices environnementaux de l'énergie nucléaire n'a que peu d'impact sur la perception individuelle de ses bénéfices économiques. Ce résultat tend par ailleurs à démontrer que les individus conservent un certain degré de rationalité lorsqu'ils sont amenés à juger de la pertinence du recours à cette technologie.

D'autre part, bien que l'impact de l'information sur la formation des croyances soit plus important lorsque cette information provient d'une association plutôt que du gouvernement, il apparaît que cet impact est statistiquement non significatif.¹² D'un point de vue qualitatif, ce résultat tend néanmoins à confirmer que le rôle de l'émetteur de l'information est primordial dans la manière dont cette dernière est traitée par l'individu (Liu et Smith, 1990 ; Zaller, 1992). A cet égard, les autorités concernées devraient être amenées à tenir compte de cet effet potentiel de l'émetteur d'information dans la mise en place de leur politique de communication relative au nucléaire.

Ces résultats sont néanmoins à prendre avec précaution dans la mesure où cette expérimentation constitue une première étape dans l'appréhension des phénomènes étudiés. A ce jour, aucune autre expérience du même type n'a été menée à notre connaissance.

Il conviendra notamment de répliquer ce protocole avec davantage de participants et un panel plus représentatif de la population « réelle » (en termes d'âge, de catégorie socioprofessionnelle, ...) de manière à avoir une vision plus robuste du comportement individuel. En outre, une extension intéressante pourrait être envisagée en s'inspirant du protocole développé par Noussair *et al.* (2002, 2004). L'objectif des auteurs est d'analyser la manière dont le comportement individuel de consommation est éventuellement modifié par la présence d'OGM dans le bien alimentaire considéré. Notre idée serait, tout d'abord, de déterminer expérimentalement (*via* un mécanisme d'enchères) la disposition individuelle à payer pour une unité d'électricité produite grâce à l'énergie nucléaire. Il s'agirait ensuite d'étudier la variation de cette disposition à payer en fonction de l'information (positive ou négative) transmise aux individus, de la nature de cette information (bénéfices économiques, environnementaux, risques environnementaux, autres risques) et de son émetteur (association ou Etat). De la même manière, un tel protocole permettrait de déterminer la disposition individuelle à payer pour une énergie alternative, telle que l'énergie fossile. Ces expérimentations fourniraient une analyse plus robuste du degré d'acceptation de l'énergie nucléaire dans la mesure où elles nous permettraient d'observer le comportement de consommation « réel » de l'individu. Elles constituent en cela une extension potentiellement intéressante de ce travail.

Une autre extension de ce travail pourrait également consister à profiter de l'existence d'une centrale nucléaire en Alsace. Il pourrait alors être intéressant de déplacer une partie de la population du village concerné (Fessenheim) pour effectuer des expériences en laboratoire. De telles expériences pourraient notamment permettre de tester le caractère subi (individus habitant depuis plus de 30 ans dans le village – sachant que la centrale a 30 ans) ou le caractère choisi du risque (habitants ayant choisi de s'installer à Fessenheim après la construction de la centrale). D'autres caractéristiques de la perception des risques pourraient également être analysées grâce à ce type d'expérience dans la

¹² Le caractère international, et non local, de l'association Greenpeace peut être un élément explicatif. Si l'information était donnée par une association ou une entité (collectivité, ...) locale, la différence pourrait être plus significative. Mais à ce stade de nos recherches, il ne s'agit que d'une hypothèse. Aucune expérience allant dans ce sens n'a encore été menée.

mesure où elle s'inscrirait dans le contexte du *field experiment*. En d'autres termes, non seulement l'expérience serait contextualisée, mais elle serait également menée avec de « vrais » sujets.

Annexes

Instructions

Bienvenue

Vous participez à une expérience relative à la perception des risques dans laquelle vous pouvez gagner de l'argent. La somme d'argent que vous gagnerez dépendra de vos décisions. Toutes les décisions que vous aurez à prendre et toutes les informations dont vous disposerez se feront par le terminal informatique qui vous est attribué. La somme d'argent gagnée pendant l'expérience vous sera versée en espèces et de manière anonyme à la fin de celle-ci.

Cadre général de l'expérience

Cette expérience comporte 5 séquences de 4 affirmations chacune, soit un total de 20 affirmations. Chaque affirmation peut être vraie ou fausse et vous serez amenés à indiquer, en déplaçant un curseur, votre degré de confiance entre 0% (« selon moi, cette affirmation est incorrecte ») et 100% (« selon moi, cette affirmation est correcte »).

On considère que 1% correspond à 1 point dans toute l'expérience. Pour chaque affirmation, vous avez la possibilité de gagner 100 points, soit un total de 2000 points pour toute l'expérience. Les points seront convertis à la fin de l'expérience en euros. La procédure de conversion des points en euros sera détaillée à la fin des instructions. La suite des instructions vous permettra de comprendre de quelle manière l'évolution de votre capital de points sera calculée au cours de l'expérience.

Déroulement d'une séquence

Chaque séquence comprend 3 phases.

1^{ère} phase :

L'ordinateur devant lequel vous êtes placés affichera 4 affirmations et en face de chacune d'entre elles vous observerez une échelle de 0% à 100% doté d'un curseur mobile (par défaut celui-ci est positionné au niveau 50% au début de la séquence).

Pour chaque affirmation, vous devez indiquer votre degré de confiance en déplaçant le curseur. A chaque fois que vous déplacez le curseur, le pourcentage choisi s'affiche à côté de celui-ci. De la même façon, si vous indiquez directement votre pourcentage de croyance, le curseur se déplace automatiquement. Dans chaque séquence il y a toujours au moins deux affirmations vraies.

Exemple :

L'écran de l'ordinateur devant lequel vous êtes assis affiche l'affirmation suivante :

« La distance entre la Terre et le Soleil est comprise dans l'intervalle [30 000 000 km ; 180 000 000 km] ».

Si vous pensez que cette affirmation est correcte, vous déplacez le curseur vers la droite jusqu'au niveau reflétant le mieux votre croyance, par exemple 85%.

Cela signifie ainsi que, selon vous, il y a 85 chances sur 100 pour que la vraie distance entre la Terre et le Soleil soit comprise dans l'intervalle [30 000 000 km; 180 000 000 km].

Si vous pensez que cette affirmation est incorrecte, vous déplacez le curseur vers la gauche jusqu'au niveau reflétant le mieux votre croyance, par exemple 22%. *Cela signifie ainsi que, selon vous, il y a 22 chances sur 100 pour que la vraie distance entre la Terre et le Soleil soit comprise dans l'intervalle [30 000 000 km; 180 000 000 km].*

Cette phase dure 5 minutes au maximum et elle se termine une fois que tous les participants ont pris leurs décisions pour les 4 affirmations de la séquence.

2^{ème} phase :

Avant de connaître les bonnes réponses et de calculer vos gains en points, un nouvel écran vous indique une **information** relative aux affirmations proposées. Sur la base de cette information, vous avez la possibilité de modifier vos choix initiaux.

Reprenons l'**exemple** précédent :

L'écran de votre ordinateur indique l'information suivante : « La distance entre la Terre et la Lune est exactement égale à 384 403 km ».

Si vous pensiez que l'affirmation précédente était correcte avec un degré de 85%, et que cette nouvelle information conforte votre décision, alors vous pouvez augmenter ce degré, par exemple à 91%.

Si vous pensiez que l'affirmation précédente était correcte avec un degré de 85%, et que cette nouvelle information ne conforte pas votre décision, alors vous pouvez diminuer ce degré, par exemple à 80%.

Si vous pensiez que l'affirmation précédente était correcte avec un degré de 85%, et que cette nouvelle information n'affecte pas votre décision, alors vous pouvez maintenir ce degré à 85%.

Pour prendre ces décisions, vous disposez de 3 minutes au maximum.

3^{ème} phase :

Une fois que tous les participants ont pris leurs décisions, un dernier écran énonce correctement les affirmations, vos gains en points pour chacune d'entre elles ainsi que le gain total de la séquence.

Le gain pour une affirmation correcte est calculé de la façon suivante : $100 - \frac{(100 - R)^2}{100}$ où R correspond à votre réponse.

Le gain pour une affirmation incorrecte est calculé de la façon suivante : $100 - \frac{(0 - R)^2}{100}$ où R correspond à votre réponse.

Dans l'**exemple** précédent, si vous avez répondu 91%, alors R=91. Cette affirmation était correcte, la distance séparant la Terre et le Soleil est de 150 000 000 km. Votre gain s'élève à $100 - \frac{(100 - 91)^2}{100} = 99,19$ points pour cette affirmation (sachant que le gain maximum pour chaque affirmation est de 100 points).

Pour illustrer une mauvaise décision, supposons que vous avez répondu R=91 pour une affirmation qui s'avère être fausse. Dans ce cas, votre gain s'élève à $100 - \frac{(0 - 91)^2}{100} = 17,19$ points pour cette affirmation (sachant que le gain minimum pour chaque affirmation est de 0 point).

Mode de calcul des gains en euros

A la fin de l'expérience (quand tout le monde aura participé aux 5 séquences), l'ordinateur calculera la somme des points gagnés par chaque participant. Ces points seront convertis en euros avec un taux de conversion de 1 euro pour 100 points. A ces points, une fois convertis en euros, s'ajoute un forfait de participation de 5 euros. Ainsi, si vous obtenez un score de 1500 points alors votre gain pour l'expérience sera de 15 euros et vous obtiendrez 20 euros en tout.

Pour connaître le montant de vos gains, vous devrez répondre à quelques questions d'ordre général concernant votre âge, genre, niveau et discipline d'études, ...Cela vous prendra seulement quelques minutes.

Avant de démarrer l'expérience, vous répondrez à un petit questionnaire, posé par l'ordinateur, afin de vérifier votre bonne compréhension des règles.

Nous vous encourageons à prendre quelques minutes pour relire les instructions. Si vous avez des questions, levez la main, une personne viendra y répondre de façon individuelle. Pendant le déroulement de l'expérience, il vous est demandé de garder le silence : toute communication entraînera votre exclusion sans paiement des gains éventuels. Merci de bien vouloir respecter ces consignes.

Merci de votre participation et bonne chance !

Questionnaire sur les instructions

Pour chaque question, les participants doivent répondre « vrai » ou « faux ».

1/ "Chaque séquence comporte 20 affirmations."

"C'est Faux. Chaque séquence comporte 5 affirmations."

2/ "Lors de la 2ème phase d'une séquence donnée, l'information qui vous est donnée peut être incorrecte."

"C'est Faux. L'information donnée est toujours correcte."

3/ "Vous avez indiqué un degré de confiance de 28% dans une affirmation. Celle-ci s'avère finalement fausse. Votre gain s'élève à 72 points."

"C'est Faux. Votre gain s'élève à 92,16 points."

4/ "Vous avez indiqué un degré de confiance de 28% dans une affirmation. Celle-ci s'avère finalement vraie. Votre gain s'élève à 48,16 points."

"C'est Vrai. Votre gain s'élève à 48,16 points."

5/ " Le gain maximal dans toute l'expérience hors forfait de participation s'élève à 2000 points, soit 10€."

"C'est Faux. 2000 points est en effet équivalent à 20€."

6/ "Votre gain total à la fin de l'expérience peut-être négatif."

"C'est Faux. Votre gain minimal (avec le forfait de participation) est de 5€ ."

7/ "Si lors de la deuxième phase d'une séquence, une information augmente votre degré de confiance dans une affirmation, vous déplacez le curseur vers la droite."

"C'est Vrai. Si lors de la deuxième phase d'une séquence, une information augmente votre degré de confiance dans une affirmation, vous déplacez le curseur vers la droite."

8/ "A partir de la séquence n° 2 votre choix lors de la première phase d'une séquence peut être modifié avant qu'un écran annonce la réponse correcte."

"C'est Vrai. A partir de la séquence n° 2, ce choix peut être modifié lors de la 3ème phase."

9/ "Il est possible que toutes les affirmations d'une séquence soient fausses."

"C'est Faux. il existe toujours au moins 2 affirmations vraies."

10/ "Il est possible que toutes les affirmations d'une séquence soient vraies."

"C'est vrai. Il est possible que toutes les affirmations d'une séquence soient vraies."

Questionnaire final

- Etes-vous favorable à l'utilisation de Kwh d'électricité d'origine majoritairement nucléaire ?

(Cochez votre réponse) **Oui** **Non**

- Quel est votre âge ?

• Quel est votre genre ? Féminin Masculin

• Quelle est votre année d'études ? L1 L2 L3 M1 M2 +

- Quel est votre type de cursus universitaire ?

Sciences humaines et sociales Sciences de l'ingénieur (physique, chimie)

Sciences de la vie et de la terre Autres

- Etes-vous fumeur ? Oui Non

- Au domicile de vos parents, quel est votre principal mode de chauffage ?

Electricité Gaz naturel Charbon Fioul Energies renouvelables Autre

- Utilisez-vous une climatisation ?

Oui, en voiture Oui, à mon domicile Non

- Quel est votre lieu d'habitat ? Ville Campagne

- Quel est votre principal mode de transport ?

Voiture individuelle Transport en commun Bicyclette A pied

- Quel est le montant mensuel moyen de votre facture d'électricité ?

[0;30]€ [31;60]€ [61;100]€ [101;150]€ + de 150€ Ne sait pas

Références citées

ALHAKAMI A. et P. SLOVIC (1994), "A Psychological Study of the Inverse Relationships between Perceived Risk and Perceived Benefit", *Risk Analysis*, 14, 1085-1096.

BINNEY S., MASON E., MARTSLOF R. et J. DETWEILER (1996), "Credibility, Public Trust, and the Transport of Radioactive Waste Through Local Communities", *Environment and Behavior*, 28, 283-301.

- COBB M. (2005), "Framing Effects on Public Opinion about Nanotechnology", Working Paper, Department of Political Science and Public Administration, North Carolina State University.
- FINUCANE M., ALHAKAMI A., SLOVIC P. et S. JOHNSON (2000), "The Affect Heuristic in Judgments of Risks and Benefits", *Journal of Behavioral Decision Making*, 13, 1-17.
- FISKE S. et S. TAYLOR (1991), *Social Cognition*, New-York: McGraw.
- GASKELL G., ALLUM N., WAGNER W., KRONBERGER N., TORGERSEN H., HAMPEL J. et J. BARDES (2004), "GM Foods and the Misperception of Risk Perception", *Risk Analysis*, 24, 185-194.
- KUHBERGER A. (1998), "The Influence of Framing on Risky Decisions: A Meta-Analysis", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 75, 23-55.
- LEVIN I., SCHNEIDER S. et G. GAETH (1998), "All Frames Are Not Created Equal: A Typology and Critical Analysis of Framing Effects", *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 76, 149-188.
- LIU J-T. et V. SMITH (1990), "Risk Communication and Attitude Change: Empirical Evidence from Taiwan", *Journal of Risk and Uncertainty*, 3, 331-349.
- McDANIELS T., AXELROD L., CAVANAGH N. et P. SLOVIC (1997), "Perception of Ecological Risk to Water Environments", *Risk Analysis*, 17, 341-352.
- NELSON T., OXLEY Z. et R. CLAWSON (1997), "Toward a Psychology of Framing Effects", *Political Behavior*, 19, 221-246.
- NOUSSAIR C., ROBIN S. et B. RUFFIEUX (2002), "Do Consumers Not Care about Biotech Foods or Do They Just Not Read the Labels ?", *Economics Letters*, 75, 47-53.
- NOUSSAIR C., ROBIN S. et B. RUFFIEUX (2004), "Do Consumers Really Refuse to Buy Genetically Modified Food ?", *Economic Journal*, 114, 102-120.
- SAVAGE I. (1993), "An Empirical Investigation into the Effect of Psychological Perceptions on the Willingness-to-Pay to Reduce Risk", *Journal of Risk and Uncertainty*, 6, 75-90.
- SIEGRIST M. (2000), "The Influence of Trust and Perceptions of Risk and Benefit on the Acceptance of Gene Technology", *Risk Analysis*, 20, 195-203.
- SLOVIC P. (1987), "Perception of Risk", *Science*, 236, 280-285.
- SLOVIC P. (1993), "Perceived Risk, Trust, and Democracy", *Risk Analysis*, 13, 675-682.
- SLOVIC P., FLYNN J., MERTZ J., POUMADERE C. et C. MAYS (2000), "Nuclear Power and the Public: A Comparative Study of Risk Perception in France and the United States", in RENN O. et B. ROHRMANN (Eds.), *Cross-Cultural Risk Perception*, 55-102, Boston: Kluwer Academic.
- ROTH A. et E. PERANSON (1999), "The Redesign of the Matching Market for American Physicians: Some Engineering Aspects of Economic Design", *American Economic Review*, 89, 748-780.

- TVERSKY A. et D. KAHNEMAN (1981), "The Framing of Decision and The Psychology of Choice", *Science*, 211, 453-458.
- WIEDEMANN P. et H. SCHUTZ (2006), "Framing Effects on Risk Perception of Nanotechnology", Working Paper, Research Center Julich.
- ZALLER J. (1992), *The Nature and Origins of Mass Opinion*, Cambridge: Cambridge University Press.

II. Energie nucléaire et couverture des risques : complémentarité des approches financière et assurantielle ?

André Schmitt, Sandrine Spaeter

Rappel des objectifs

Le risque nucléaire entre sans conteste dans le champ des grands risques, caractérisés par une faible probabilité d'occurrence mais pouvant causer des sinistres à grande échelle et parfois irréversibles pour l'homme et son environnement. La question de la couverture de ce type de risque est cruciale dans la mesure où la forte corrélation des dommages supportés par les victimes et la difficulté d'estimer les distributions a priori de sinistres remettent fortement en question l'application des mécanismes assurantiels standards basés sur l'élimination du risque agrégé. De fait, la couverture contre les grands risques n'est souvent pas disponible ou est proposée à des niveaux de primes d'assurance substantiellement supérieurs à l'espérance des pertes estimées. Pour Froot (2001), la raison essentielle tient aux limites mêmes du marché de la réassurance caractérisé par des barrières à l'entrée et de fortes imperfections. Ces limites se traduisent par l'existence d'un quasi-monopole du fait du nombre très limité d'acteurs à travers le monde ayant une surface financière conséquente pour faire face à des indemnisations qui peuvent être colossales en cas d'accident.

Une problématique pertinente dans l'optique de la couverture des risques nucléaires tient alors à l'analyse de l'intérêt du recours aux instruments alternatifs ou complémentaires à l'assurance standard. Une expertise similaire a déjà été développée au BETA dans le domaine de la couverture contre le risque de pollution maritime par les hydrocarbures¹³ (partenariat IFE/BETA/GERME (2002), Schmitt et Spaeter (2003, 2005a, 2005b, 2005c)). Nous nous proposons de vérifier l'adéquation de plusieurs instruments – assurantiels, financiers et d'auto assurance - et des mesures alternatives aux spécificités du secteur nucléaire. Cette étude ne pouvant pas se faire en dehors du cadre des législations qui régissent l'activité nucléaire civile, nous avons également mené un travail d'investigation sur les textes législatifs et d'analyse économique des comportements des opérateurs face aux contraintes législatives actuelles et envisagées dans le futur.

1. L'impact des législations sur les conditions de la couverture du risque nucléaire

Ce travail a fait l'objet de l'article Schmitt et Spaeter, (2007b), « Risque nucléaire civil et responsabilité optimale de l'opérateur », à paraître dans un numéro spécial de la Revue Economique. (Ed. : B. Deffains).

La principale objection avancée contre l'expansion de l'industrie nucléaire civile tient à la sécurité de la technologie employée pour produire l'électricité. Très tôt, le législateur a reconnu la nécessité

¹³ Si l'ampleur du risque de marée noire est sans commune mesure avec le risque nucléaire, l'étude montre les avantages d'un panachage d'instruments de couverture, notamment de contrats d'assurance standard et de couverture par les marchés financiers.

d'encadrer l'activité nucléaire et de responsabiliser les producteurs. Le contrôle peut être directif à travers le respect des normes de sécurité édictées par l'AEIA (International Atomic Energy Agency) appelées normes NUSS (Nuclear Safety Standards). Il peut s'effectuer de manière incitative par les lois engageant la responsabilité du producteur en cas d'accident nucléaire.

Ainsi, deux ensembles de conventions internationales régissent la responsabilité civile du producteur. D'une part, la Convention de Paris du 29 juillet 1960 portant sur la responsabilité du parti tiers complétée par la Convention de Bruxelles du 31 janvier 1963 portant sur les fonds supplémentaires, ont été élaborées sous l'égide de la NEA (Nuclear Energy Agency) et regroupent essentiellement des pays signataires de l'Europe de l'Ouest. D'autre part, la Convention de Vienne, mise en place sous les auspices de l'IAEA et promulguée le 21 mai 1963, regroupe 33 pays signataires en 2002.

Globalement, ces conventions ont de grandes similarités en stipulant notamment la responsabilité stricte de l'opérateur nucléaire, la limitation de la responsabilité en montant et dans le temps et l'obligation faite à l'opérateur de se couvrir jusqu'aux plafonds spécifiés.

Les responsabilités du producteur et de l'Etat signataire dans le cadre de ces conventions internationales sont décrites précisément dans le point a). Le point b) présente les résultats que nous avons obtenus en modélisant le processus de couverture par l'opérateur, par l'Etat sur le sol duquel est installée la centrale nucléaire et, enfin, par l'ensemble des Etats signataires des conventions. Dans ce cadre d'analyse, nous avons recherché le niveau optimal de responsabilité en regard du niveau de prévention décidé par l'opérateur.

1.1. Le cadre législatif régissant le risque nucléaire

a) Les Conventions internationales

Dès la création des premières centrales nucléaires dans les années cinquante, les autorités publiques des différents pays producteurs ont reconnu la nécessité de mettre en place un régime de responsabilité civile international en réponse à un risque majeur dont la prolifération se joue des frontières nationales. Sous les auspices de l'OCDE et de son bras armé, le NEA, les pays de l'OCDE ont adopté la Convention sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire le 28 juillet 1960 (dite «Convention de Paris »). Celle-ci a été complétée par la « Convention complémentaire de

Bruxelles » adoptée le 31 janvier 1963 visant à mobiliser des moyens de dédommagement supplémentaires si les sommes disponibles sur la base de la Convention de Paris s'avéraient insuffisants. 12 pays ont ratifié ces deux Conventions³. Parallèlement, la « Convention de Vienne » a été adoptée le 21 mai 1963 sous les auspices de l'AIEA. Elle regroupe 33 Etats Parties, essentiellement de l'Europe de l'Est, de l'Amérique du Sud, d'Afrique et du Pacifique⁴. Elle a également fait l'objet d'un amendement majeur visant à renforcer les capacités d'indemnisation à travers l'adoption de la Convention¹⁹ sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires le 12 septembre 1997.

Les Conventions de Paris et de Vienne sont des régimes de responsabilité limitée qui concernent les dommages causés aux tiers. Ils sont essentiellement régis par des principes similaires. Ainsi, la Convention de Paris amendée repose sur les quatre piliers suivants :

1. La responsabilité est canalisée vers l'opérateur des installations nucléaires.

Sa responsabilité est exclusive.

2. Sa responsabilité est objective, qu'il soit fautif ou non.

3. Sa responsabilité est limitée en montant et dans le temps. La demande de dédommagements doit être effectuée dans les 30 ans qui suivent l'accident pour les dommages aux personnes et 10 ans pour les dommages matériels.

4. L'obligation est faite à l'opérateur de contracter une assurance ou d'apporter des garanties financières correspondant aux plafonds à sa charge.

La Convention s'est voulue équilibrée dans le sens où intérêts des victimes potentielles et des exploitants d'installations nucléaires sont protégés. La responsabilité objective de l'exploitant se traduit par l'obligation faite à la victime d'établir le lien objectif de causalité entre le fait générateur et le dommage sans qu'elle n'ait à prouver la faute de l'auteur responsable du dommage. Combinée avec son exclusivité, la responsabilité objective a vocation à assurer une indemnisation rapide et sûre des victimes, d'autant que les contentieux sont rassemblés sous une même juridiction, le tribunal de l'Etat d'installation. Elle est contrebalancée par la responsabilité limitée, condition nécessaire au développement d'un secteur qui pourrait difficilement assurer seul l'indemnisation intégrale de dommages causés par des incidents majeurs en raison de primes d'assurance qui seraient prohibitives. De fait, l'adoption de ces régimes à responsabilité limitée constitue une forme de subvention implicite accordée aux exploitants par les Etats qui prennent en charge — au moins partiellement - le risque résiduel (Heyes et Heyes, 2000).

b) Les plafonds de responsabilité de l'opérateur et des parties contractantes

Les plafonds définissant les montants de responsabilité à charge de l'exploitant et des Etats Parties ont été rehaussés substantiellement par différents amendements. Les derniers en date, stipulés dans les Protocoles portant modification des Conventions de Paris et de Bruxelles, ont été signés le 12

¹⁹ L'Allemagne, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, l'Italie, la Norvège, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Slovaquie et la Suède. La Grèce, le Portugal et la Turquie ont ratifié uniquement la Convention de Paris. La Fédération de Russie a notamment signé la Convention de Vienne le 8 mai 1966 et elle est entrée en vigueur le 13 août 2005.

février 2004 à Paris. Il s'agit en réalité d'une architecture à trois tranches de réparation complémentaire définissant respectivement les responsabilités de l'exploitant, de l'Etat et de l'ensemble des Etats Parties :

1. La première tranche, définie par le Protocole portant modification de la Convention de Paris, prévoit actuellement un montant de responsabilité minimum de l'exploitant de 700 millions d'euros. Les Etats peuvent toutefois fixer dans leur législation nationale un plafond supérieur voire une responsabilité illimitée de l'opérateur.

2. Le plafond de la deuxième tranche qui est définie par le Protocole portant modification de la Convention complémentaire de Bruxelles, est généralement à la charge de l'Etat sur lequel se trouve l'installation de l'exploitant responsable. Elle est portée à 1200 millions d'euros. Cette tranche de 500 millions peut également être prise en charge en partie ou en totalité par l'exploitant selon ce que la législation nationale stipule (point 1).

3. La troisième tranche, financée par l'ensemble des Etats ayant adopté la Convention de Bruxelles selon un principe de mutualisation, s'élève à 300 millions d'euros, portant le plafond total d'indemnisation à 1,5 milliards d'euros. La clé de répartition des contributions à cette troisième tranche, à l'origine basée à 50% du PNB et 50% de la capacité nucléaire installée, a été modifiée et met l'accent sur la capacité nucléaire de la Partie contractante. Elle représente désormais 65% de la clé de répartition (contre 35% pour le PIB, le PNB ayant été abandonné). Cette modification reflète la volonté de responsabiliser d'avantage les grands producteurs.

Les Protocoles de 2004 ont également défini de nouvelles règles de modalités de versements des fonds. En effet, dès que le montant d'indemnisation est supérieur à 1,2 milliards d'euros, il est fait appel à la troisième tranche même si le droit du pays stipule une responsabilité de l'exploitant telle que son plafond est supérieur à ce seuil²⁰. Cette disposition vise à éviter de pénaliser les pays ayant voté des lois les plus exigeantes vis à vis de l'exploitant.

Ces protocoles ne sont pas encore en vigueur à la date de rédaction de cet article, et ne le deviendront que lorsque deux tiers des pays signataires de la Convention de Paris et la totalité des pays signataires de la Convention de Bruxelles les auront ratifiés.

c) Convergence des conventions internationales

La juxtaposition de deux régimes internationaux de responsabilité civile n'a pas été sans poser de difficultés quant aux règles d'indemnisation en cas d'accident majeur survenant dans un pays contractant d'une Convention mais faisant des victimes dans les pays ayant ratifié l'autre Convention. Le premier pas significatif vers la convergence des deux systèmes a été l'adoption du Protocole commun relatif à l'application de la Convention de Vienne et de la Convention de Paris, dit « Protocole

²⁰ A titre d'exemple, si la responsabilité de l'opérateur est fixée à 1,4 milliards d'Euros, un accident de 1,3 milliards sera couvert à hauteur des 1,2 milliards de responsabilité de l'opérateur concernant le premier niveau (l'opérateur payant également, dans cet exemple, la deuxième tranche) et des 100 millions restant à la charge de l'ensemble des parties contractantes selon le principe de la troisième tranche. L'opérateur "économise", dans ce système, 200 millions. Il n'aura à les mobiliser que pour un sinistre supérieur à 1,5 milliards (une fois que les ressources engagées par l'ensemble des parties contractantes auront été épuisées).

commun ». Ce Protocole, entré en vigueur le 27 avril 1992, compte actuellement 24 Parties. Il permet à une victime d'un pays n'ayant pas ratifié la Convention de Paris d'être indemnisée à condition qu'elle soit originaire d'une Partie ayant ratifié la Convention de Vienne et le Protocole Commun (et inversement).²¹

d) *Latitude laissée aux législations nationales quant à la responsabilité de l'opérateur*

Dans tout pays signataire de la Convention de Paris, la responsabilité de l'opérateur est fixée au minimum à 700 millions d'euros. Le législateur national a toutefois la possibilité d'augmenter ce plafond. On observe ainsi une grande hétérogénéité parmi les pays ayant ratifié les Conventions de Paris et de Bruxelles. L'Allemagne a opté pour une responsabilité illimitée de l'opérateur alors que la France s'est contentée d'appliquer a minima les conventions internationales. Les lois n° 90-488 du 16 juin 1990, article 3 et n° 2006-686 du 13 juin 2006, article 55 amendant l'article 4 de la loi du 30 octobre 1968 stipulent que « le montant maximum de la responsabilité de l'exploitant est fixé à 700 millions d'euros pour les dommages nucléaires causés par chaque accident nucléaire ».

1.2. Responsabilité et prévention optimales

Dans le cadre de la synthèse et du travail d'analyse des principes généraux des deux conventions régissant la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires au niveau international (la convention de Paris et la convention de Vienne), nous faisons finalement le constat que les conventions internationales ont deux objectifs affichés : maximiser les montants mis à disposition des victimes en cas d'accident majeur et inciter les producteurs à minimiser la probabilité d'un accident en engageant les dépenses et les efforts adéquats en mesures de sécurité. Selon plusieurs observateurs, les régimes de responsabilité civile ont échoué sur ces deux plans dans la plupart des pays du monde. Par exemple, Faure et Van Den Bergh (1990) analysent les débats parlementaires en Belgique qui ont conduit à la fixation du plafond de responsabilité de l'opérateur. Ils mettent en lumière l'efficacité du travail de lobbying du pool d'assurance nucléaire SYBAN, détenant le monopole dans ce pays, qui a conduit à un plafonnement minimal des indemnités dues par le producteur. Les régimes internationaux ont été aussi attaqués sur les fondements théoriques de la responsabilité stricte. En cas d'accident, elle facilite l'identification du responsable — en l'occurrence le producteur — et donc le processus d'indemnisation. Celle-ci est limitée dans les législations internationales de sorte que certains auteurs (Faure (1995); Trebilcock et Winter (1997)) préconisent l'instauration d'un régime à responsabilité illimitée de l'opérateur avec charge aux victimes ou à une autorité indépendante d'établir les responsabilités effectives — l'opérateur et/ou les sous-traitants de la centrale nucléaire. La responsabilité illimitée — telle qu'imposée déjà en Suisse, en Allemagne ou au Japon - aurait

²¹ L'harmonisation des deux systèmes a été complétée par les deux Protocoles de 2004 décrits plus haut. Outre le relèvement des plafonds d'indemnisation, ces Protocoles ont également permis d'étendre la définition de dommage nucléaire, réduit auparavant aux dommages aux biens et aux personnes, et incluant dorénavant le coût de mesures préventives, le coût des mesures visant à restituer un environnement endommagé et les pertes économiques résultant de la détérioration de cet environnement.

l'avantage de sensibiliser le producteur à des pertes potentielles plus importantes et l'inciter ainsi à dépenser davantage en mesures préventives. Elle pousserait ainsi l'agent à internaliser tout le risque qu'il fait subir à la société et permettrait d'éviter le phénomène de la firme "à l'épreuve du jugement" (Shavell, 1979)).

Il est toutefois important de noter que la règle de la responsabilité limitée a été mise en place dans le domaine économique et juridique afin de permettre à des firmes de prendre des risques (raisonnables) en innovant, sans être systématiquement freinée par le poids de sa responsabilité en cas d'échec de son projet. Ces arguments doivent alors être nuancés dans la mesure où ces investissements en prévention peuvent détériorer les conditions financières de l'opérateur dès lors que le prix de l'énergie nucléaire ne tient pas entièrement compte de ces investissements²² (par exemple, parce qu'elle est en concurrence avec d'autres types d'énergie).

La question est finalement de savoir si tout rehaussement du plafond est désirable et si une responsabilité illimitée est véritablement la solution du point de vue de la maximisation du bien-être de la Société.

a) Le modèle

Pour répondre à cette question, nous avons développé un modèle de responsabilité dans lequel une partie contractante doit déterminer le niveau de responsabilité de la firme nucléaire installée sur son territoire tout en tenant compte de l'impact que sa décision aura sur les motivations de l'opérateur à investir en prévention. Deux cas sont envisagés dans Schmitt et Spaeter (2007b) : celui de la responsabilité limitée à la première ou à la seconde tranche et celui qui correspond à une responsabilité (quasi) illimitée de l'opérateur. Ces différentes possibilités sont représentées sur la figure 1.

Dans le premier schéma, la partie contractante impose dans sa législation nationale une responsabilité à l'opérateur qui se situe entre le seuil minimal x_1 défini par les Conventions et le seuil x_2 à partir duquel interviennent les parties ayant ratifié la Convention de Bruxelles. Dans les deux autres schémas, sa responsabilité \bar{x} est supérieure au second seuil et, de ce fait, une partie des fonds de l'opérateur n'entrera en jeu que lorsque le dommage dépassera le troisième et dernier seuil. La modélisation est identique dans les deux derniers schémas, mais diffère par rapport au premier, ce qui explique la présence d'indicateurs dans les fonctions de coûts que nous considérons plus bas.

L'objectif du régulateur est de choisir le niveau de responsabilité \bar{x} à imposer à l'opérateur dans sa législation nationale qui minimise les coûts sociaux liés à l'activité nucléaire. Les coûts sociaux sont égaux à la somme des dommages attendus des victimes, des coûts de la responsabilité et de la prévention de l'opérateur et du coût de participation aux conventions internationales de la partie contractante.

²² Voir notamment Trebilcock et Winter (1995) ou Faure (1995).

Dans ce cadre, d'analyse, nous nous intéressons à l'impact d'une modification du montant de responsabilité laissée à la charge de l'exploitant nucléaire sur sa politique de prévention d'accidents. Nous analysons l'impact du rehaussement de ce plafond sur la solvabilité de l'exploitant ainsi que sur sa politique de prévention.

b) Les résultats

En considérant des hypothèses sur les distributions des risques en accord avec les spécificités du risque nucléaire, nous montrons en particulier qu'une augmentation de la responsabilité de l'opérateur au-delà d'un plafond déterminé par le modèle l'incite à diminuer ses activités de prévention, contrairement à ce qui est attendu. Par ailleurs, l'impact des activités de prévention, coûteuses, sur la contrainte financière de l'opérateur dépend de l'élasticité de la distribution du risque, ce qui nous fait dire que les mesures de prévention entreprises doivent être discutées en fonction du degré de gravité des accidents concernés.

Précisément, les résultats que nous obtenons sont les suivants (ils sont démontrés dans l'article de recherche Schmitt et Spaeter (2007b)) :

- Lorsque la responsabilité de l'opérateur est limitée aux deux premières tranches des conventions internationales, toute augmentation du niveau de responsabilité de l'opérateur incite ce dernier à augmenter son niveau de prévention. L'impact bénéfique sur la société se fait essentiellement à travers les incitations qu'une augmentation du plafond génère en termes d'investissement préventif. Et cet effet existe à tous les niveaux de responsabilité nets de la responsabilité des autres parties contractantes dans la troisième tranche.

Par ailleurs, nous montrons que le bénéfice marginal espéré de la prévention est toujours positif si la distribution du risque est "suffisamment" sensible à une variation du niveau de prévention (techniquement si l'élasticité entre la dérivée de la distribution cumulée par rapport à la prévention et le niveau de responsabilité est supérieure à moins un) . Ainsi, une augmentation du plafond entraîne toujours une augmentation de la prévention. Mais cette prévention n'a pas le même impact sur la distribution du sinistre selon que l'on cherche à agir sur les petits sinistres, donc plus fréquents, ou les grands, donc moins fréquents mais plus dommageables.

Finalement, il ne suffit pas d'inciter la firme à investir dans la prévention sans que d'autres mesures portant cette fois sur le type de prévention, soient envisagées.

Enfin, une augmentation de la prévention a un coût que seule l'entreprise supporte. Ainsi, l'augmentation du plafond augmente certes le bien-être de la société, mais peut être, simultanément, à l'origine d'une détérioration de la condition financière de l'opérateur. Plus précisément, nous montrons que si l'assureur de l'opérateur n'a pas les moyens d'observer son niveau de prévention, alors toute augmentation de l'investissement en prévention de l'opérateur entraîne une baisse du

montant de sinistre à partir duquel l'opérateur est mis en liquidation : sa condition financière se détériore.

- Si la responsabilité de l'opérateur est fixée à un niveau supérieur au plafond de la deuxième tranche, nos résultats ne sont plus aussi immédiats. Il existe notamment un seuil à partir duquel toute augmentation du plafond de responsabilité de l'opérateur entraîne une diminution de ses investissements en prévention.

L'opérateur est maintenant incité à réduire son niveau de prévention si sa responsabilité est "trop" grande, voire illimitée. Ce résultat tient aux propriétés, réalistes, de la fonction de coût de la prévention et de la distribution du risque nucléaire. Le coût de la prévention augmente à un taux croissant (ou constant) tandis que l'amélioration de la distribution cumulée du risque suite à une augmentation de la prévention et au sens de la dominance stochastique d'ordre un se fait à un taux décroissant. Finalement, l'augmentation à la marge de la prévention coûtera plus cher à l'opérateur à partir d'un certain niveau que ce que cela lui rapporte en termes de diminution du risque nucléaire.

Techniquement, ce résultat est obtenu du fait de la propriété de monotonie du ratio de vraisemblance et ne va pas dans le sens des arguments que Faure (1995) développe pour justifier que l'on passe à une responsabilité illimitée de l'opérateur nucléaire.

c) Discussion

En considérant une Partie contractante aux Conventions internationales qui doit décider du niveau de responsabilité à imposer à l'opérateur nucléaire en exercice sur son territoire, nous avons mis en avant plusieurs résultats que nous discutons ici. Ainsi, nous avons montré que l'impact d'une hausse du plafond de responsabilité de l'opérateur sur ses incitations à augmenter son niveau de prévention dépend des caractéristiques de la distribution du risque et, en particulier, de l'élasticité de sa dérivée par rapport au niveau de prévention. Ce résultat nous amène à conclure que la taille du parc nucléaire dont l'opérateur concerné est propriétaire, qui reflète le risque encouru, doit être un élément à prendre en compte lors de l'élaboration de la législation nationale. Plus précisément il n'est pas optimal d'établir une relation linéaire entre le niveau de responsabilité et la taille du parc nucléaire de l'opérateur. Cette conclusion est renforcée par le résultat que nous avons obtenu dans le cadre d'une responsabilité potentiellement illimitée. Au-delà d'un seuil de responsabilité, l'opérateur peut être amené à diminuer ses activités de prévention, le coût de la prévention augmentant à un taux linéaire ou croissant, tandis que l'amélioration de la distribution du risque se fait à un taux décroissant.

Ainsi, du fait des caractéristiques de la distribution relative au risque nucléaire, la prévention n'aura pas le même impact selon la taille du parc nucléaire. Le cas d'une distribution uniforme du risque pouvant être évacué du fait d'un manque évident de réalisme, la sensibilité de la distribution à la prévention joue un rôle important : tous les investissements n'ont pas le même impact. Ceci signifie que, outre les incitations à investir en prévention qu'une augmentation de la responsabilité peut générer en-deçà d'un certain plafond, il faut également que le régulateur puisse orienter l'opérateur vers certains types de mesures de prévention. Ceci ne peut se faire qu'en dehors du cadre du secret-

défense et pose alors la question du contrôle et du coût pour la société d'un système sophistiqué qui reposerait à la fois sur des aspects quantitatifs (combien investir en prévention) et des aspects qualitatifs (dans quels types de mesure investir). Par ailleurs, ce secret-défense rend également le contrôle délicat pour un assureur. Il peut difficilement, dans ces conditions, proposer une prime d'assurance qui serait réévaluée en fonction des mesures de prévention adoptées par la firme. Cette caractéristique empêche alors l'investissement en prévention consenti par l'opérateur d'avoir un effet bénéfique (en termes de baisse de coûts) sur la prime d'assurance qu'il paie et rend cet investissement comparativement plus coûteux, tandis que la distribution du risque n'est pas affectée par les décisions d'assurance de l'opérateur. Cet argument plaide en faveur du développement des techniques d'auto-assurance telles que celles utilisées par les captives. En couvrant son propre risque, un opérateur peut, a priori, faire dépendre les primes qu'il verse à sa captive de ses activités de prévention.

Ce point nous amène alors naturellement à nous poser la question de la fiabilité des données concernant les probabilités d'accident prises en compte dans l'évaluation du risque nucléaire. A ce sujet plusieurs études empiriques (Wood, 1981; Heyes et Heyes, 2000) montrent qu'il n'y a pas forcément un consensus sur les probabilités d'accident nucléaire. Nos résultats mettent en avant la nécessité de continuer à travailler à la détermination des distributions les plus fiables possibles, afin de conditionner les types de mesures préventives préconisées au type de la distribution concernée.

Un autre élément qui mérite d'être discuté tient à la sophistication de la législation internationale. Son organisation en trois tranches, avec la possibilité pour une Partie contractante de stipuler une responsabilité illimitée de ses opérateurs sans que cela interfère avec le principe de mutualisation de la troisième tranche, permet d'améliorer certains points (notamment concernant les montants indemnisés). Elle pose toutefois la question de la capacité qu'ont les agents à la mettre en oeuvre de manière optimale. Autrement dit, il n'est pas certain que toutes les parties contractantes soient en mesure de contrôler les effets sur les incitations des opérateurs à investir de manière adéquate dans des mesures de prévention. Pour pallier cette complexité, nous pouvons suggérer que les plafonds des trois tranches soient augmentés et que la responsabilité de l'opérateur reste cantonnée au deux premières tranches. Si le plafond de la seconde tranche est suffisamment élevé, la Partie contractante garde une grande latitude dans la détermination de la responsabilité de l'opérateur tout en considérant le fait que trop de responsabilité peut réduire les incitations à la prévention. Mais se pose alors à nouveau la question de l'assurance sachant que la capacité de couverture des pools nationaux est un élément clé dans la détermination des plafonds au niveau international.

Dans cet article, le type de couverture (transfert classique à un assureur moyennant le paiement d'une prime actuarielle) est exogène au modèle. Dans la seconde partie de ce travail sur les questions de responsabilité et de couverture, nous envisageons plusieurs types de couverture du risque nucléaire et nous discutons de leurs avantages et de leurs limites.

2. La couverture du risque nucléaire

L'obligation faite aux producteurs de se couvrir par garanties bancaires ou par assurance, pour des montants stipulés dans les conventions internationales, a conduit à l'élaboration d'une architecture de couverture originale et propre au secteur nucléaire. En effet, l'incapacité d'une compagnie d'assurance à couvrir seule les pertes potentielles et le manque d'expérience pour appréhender ce nouveau type de risque avaient conduit à la création de pools nationaux qui regroupent les fonds versés par les sociétés d'assurance d'un même pays afin de couvrir la responsabilité civile. Ces pools nationaux, toujours en activité, se réassurent ensuite auprès d'autres pools nationaux créant ainsi une toile mondiale de couverture réciproque. Ainsi, suite à l'accident de Three Mile Island en 1979, toutes les compagnies d'assurance à travers le monde souscrivant le risque nucléaire ont été mises à contribution directement ou indirectement à travers la réassurance. Plus récemment, pour couvrir le risque de dommage matériel, les opérateurs se sont auto-assurés à travers la création de captives telles que NEIL (Nuclear Electric Insurance Limited) aux Etats-Unis ou EMANI (European Mutual Association for Nuclear Insurance) en Europe. Ces captives ont progressivement concurrencé les sociétés d'assurance traditionnelles sur le terrain de la responsabilité civile²⁴.

2.1. Arguments assurantiels et responsabilité

Les arguments avancés pour déterminer si un risque est assurable ou non sont bien identifiés dans la littérature économique (Berliner, 1982 ; Gollier, 1996 ; Gollier, 2005). Certains, longtemps non controversés, suscitent aujourd'hui de nouvelles discussions quant à leur réelle pertinence dans le contexte des risques majeurs. D'autres, au contraire, prennent tout leur sens dans le cadre de la gestion du risque nucléaire.

Ainsi, le fait que la loi des grands nombres ne puisse pas s'appliquer à un ensemble de risques corrélés entre eux (les risques individuels d'une population autour d'une centrale par exemple) ou le fait que les coûts de transaction pourraient être trop importants ne sont plus des éléments systématiquement avancés pour justifier la faiblesse de l'offre d'assurance pour des grands risques. En revanche, le risque moral, l'incertitude et la question de la responsabilité sont au cœur de la problématique de la couverture du risque nucléaire du côté de l'offre.

a) Le risque moral

Le risque moral, tout d'abord est un problème d'asymétrie d'information d'autant plus important dans le secteur nucléaire que certaines informations concernant la technologie de production sont classées secret-défense. Rappelons que le risque moral peut survenir dans une situation où les actions (ou les

²⁴ Voir Vanden Borre (2002).

efforts) d'un agent économique affecte le résultat d'un autre agent sans que ce dernier soit capable d'observer les actions du premier. Dans notre cadre d'analyse, l'agent le moins informé est l'assureur et l'agent capable d'influencer le risque avec des efforts en prévention est l'opérateur nucléaire. Un assureur extérieur à l'entreprise peut alors avoir beaucoup de difficultés à obtenir de l'information sur les technologies de prévention des risques et ne pas être capable de tarifer la police d'assurance à son juste prix.

b) L'incertitude sur les risques futurs

A ce problème des asymétries d'information s'ajoute celui de l'incertitude, qui place tous les agents face à plusieurs scénarii risqués possibles pour l'avenir. S'il existe des échelles de gravité et des probabilités d'accident de différents niveaux sur ces échelles devenues des mesures officielles du niveau de risque présent, la situation est bien différente concernant les déchets sur le moyen et le long terme. Le fait de disposer de plusieurs scénarii possibles quant à la réutilisation des déchets par les générations futures, et donc au type de stockage optimal, crée une valeur d'option (Arrow et Fischer, 1974 ; Henry, 1974) qui doit être valorisée (Gollier, Proult et Thais, 2005 ; Chesney M., Loubergé H. et S. Villeneuve, 2002). Mais elle induit également une incertitude sur les données qu'un assureur doit prendre en compte. Il ne peut donc plus considérer une seule distribution de risque, mais plusieurs potentielles auxquelles il faut allouer des poids selon leur vraisemblance (qui dépend de l'avancée des recherches dans le domaine et des résultats de scientifiques qui peuvent diverger à court terme). Cette ambiguïté a des effets non négligeables sur l'offre d'assurance dans la mesure où elle gêne également la tarification optimale²⁵. Si opérateurs et assureurs ne considèrent pas la même distribution comme la plus probable, leurs prix de réserve peuvent être incompatibles entre eux et aboutir à l'échec de la transaction.

c) Evolution de la responsabilité et faiblesse de l'offre

La question de la responsabilité a également un impact important sur l'offre de polices d'assurance. La « liability crisis » des années quatre-vingt aux Etats-Unis a en effet montré que les assureurs étaient particulièrement sensibles à des évolutions soudaines des législations, notamment environnementales. Ils ont, dès le début des années 80, exclu bon nombre de grands risques de leurs polices d'assurance responsabilité civile à partir du moment où la nouvelle législation CERCLA sur les déchets chimiques les considéraient comme Partie Potentiellement Responsables (PPR) d'une pollution ou d'un accident causé par l'activité des firmes qu'elles assuraient ou qu'elles avaient assurées dans le passé. La rétroactivité est ainsi l'un des principes de cette loi fédérale (Anderson, 1998 ; Spaeter, 2004 ; Spaeter, 2005).

Dans le secteur du nucléaire, l'offre des assureurs est également étroitement liée au contenu des textes législatifs, mais la dépendance est différente de celle que nous venons d'évoquer : la relation de cause à effet est inversée. En effet, les montants de couverture obligatoire que les opérateurs

²⁵ La tarification optimale (au sens de l'efficacité économique) pose que la prime d'assurance doit être égale à la valeur attendue des indemnités à verser, chargée des coûts administratifs de l'assureur, d'une prime de risque si ce dernier est risco-phobe et d'un éventuel taux de marge.

doivent pouvoir garantir aux victimes d'un accident et qui sont stipulés dans les conventions internationales²⁶ son calqués sur les informations données par les assureurs concernant leur capacité de couverture. Les plafonds de couverture obligatoires pour les opérateurs sont ainsi passés d'à peine plus de 2 millions d' Euros (5 000 000 de DTS) en 1963 à 700 millions d'Euros en 2004. Les montants d'indemnisation ne dépendent pas seulement de la gravité d'un accident potentiel, mais surtout de l'offre de couverture. Cette caractéristique de la législation internationale pose la question de sa pertinence dans un contexte où les asymétries d'information prévalent. Il peut être en effet difficile de connaître la capacité financière réelle du secteur assurantiel dans le domaine du nucléaire et les compagnies peuvent alors jouer sur cette caractéristique en annonçant des montants plus faibles que ceux qu'ils pourraient effectivement assurer. C'est une manière implicite de proposer des contrats d'assurance avec limite supérieure sans savoir si ce contrat correspond à un optimum²⁷. Par ailleurs, le manque d'informations concernant la technologie du nucléaire dont peuvent souffrir les sociétés d'assurance ne plaide pas en faveur d'une annonce de leur capacité réelle. Les techniques de réassurance associées à celle de l'auto-assurance doivent alors compléter le marché de la couverture. Ce point sera discuté en détail dans la section suivante. Le paragraphe qui suit traite d'un autre élément qui influence significativement le volume et la nature des transactions d'assurance.

d) Responsabilité limitée et faiblesse de la demande d'assurance

Les opérateurs ont une obligation de détenir des garanties financières à hauteur du plafond imposé par les Conventions internationales, ou leur législation nationale si elle est plus sévère (par exemple, la Suisse et l'Allemagne ont opté pour une responsabilité illimitée de l'opérateur). Mais au-delà, aucune couverture n'est demandée dans les Conventions. Les opérateurs bénéficient ainsi d'une forme de responsabilité limitée, également perçue comme une subvention faite au secteur. Si le risque est partiellement internalisé par l'opérateur, le prix de l'énergie nucléaire ne reflètera alors pas le risque réel encouru par la société. Dans ce contexte, cette forme d'énergie est subventionnée par rapport aux autres énergies (Heyes et Heyes (2000)). Contrairement à Faure (1995), nous pensons toutefois (et nous démontrons plus loin) qu'il n'est pas toujours souhaitable de prôner la responsabilité illimitée des opérateurs dans le but de pallier ce problème de l'internalisation partielle du risque. Deux raisons peuvent être avancées. Tout d'abord, il n'est pas crédible d'annoncer à la société que la responsabilité illimitée lui garantit une pleine compensation²⁸ financière en cas d'accident nucléaire. Au-delà d'un seuil de responsabilité, la solvabilité de l'opérateur est mis à mal et même une logique du style « poche profonde »²⁹ ne suffirait pas à indemniser toutes les victimes. Ensuite, nous montrons

²⁶ Convention de Paris du 29 juillet 1960 portant sur la responsabilité du parti tiers, Convention de Bruxelles du 31 janvier 1963, Convention de Vienne du 21 mai 1963.

²⁷ Aucune étude à ce jour ne démontre la Pareto-optimalité d'un contrat avec limite supérieure dans le contexte du risque nucléaire. Néanmoins, ce type de contrat peut se justifier dans un environnement où l'assureur doit faire face à un risque majeur et présente, pour cette raison, de l'aversion au risque au sens de Arrow et Pratt (1954). Techniquement, on retrouve ce résultat dans Raviv (1979).

²⁸ Le terme même de « pleine compensation » suggère qu'il y a un réel consensus sur la valeur monétaire à donner à la vie humaine. Ceci est loin d'être le cas, mais nous n'entrerons pas dans ce débat ici.

²⁹ Cette logique consiste à rendre financièrement responsable la partie la plus solvable directement ou indirectement impliquée dans les activités de la firme incriminée.

dans Schmitt et Spaeter (2007b) que l'incitation à investir dans des mesures de prévention de plus en plus coûteuses n'augmente pas toujours avec la responsabilité de l'opérateur. A partir d'un certain seuil, la rentabilité de l'investissement (en termes de réduction des risques) peut être contrebalancée par son coût à court terme.

A cette caractéristique de la responsabilité limitée s'ajoute celle de la spécificité de la structure du marché d'assurance du risque nucléaire. Celui-ci est, en effet, particulièrement concentré ; les assureurs garantissant le risque nucléaire sont regroupés au sein de pools nationaux. Chacun de ces pools est composé exclusivement des sociétés d'assurance domiciliées dans le pays de l'opérateur. Les primes d'assurance sont alors celles d'un marché organisé en monopole³⁰ et les taux de marge appliqués, associés aux primes de risque demandées par des assureurs riscophobes face aux risques majeurs, expliquent leur niveau élevé. Associés à l'internalisation partielle du risque, ces points expliquent la faiblesse de la demande d'assurance. Ces arguments militent finalement pour un système plus concurrentiel, ce qui est envisageable si l'on considère simultanément le marché des captives et le fonctionnement des pools nationaux. Cette question sera abordée en détails dans la section b).

e) Assurance directe ou au tiers ?

La couverture du risque nucléaire actuellement proposée par les pools nationaux aux opérateurs est une assurance au tiers. Ceci signifie que les opérateurs achètent de l'assurance pour permettre aux victimes d'un accident d'être indemnisées. Ce mode de couverture est différent d'une assurance directe, pour laquelle ce sont les victimes potentielles qui signent un contrat d'assurance directement avec l'assureur.

Dans le cadre du nucléaire, le contrat au tiers peut se justifier. Faure (1995) explique en effet qu'un tel type de contrat conditionne le versement d'indemnités à la preuve de la responsabilité de l'opérateur. Or cette preuve n'est pas, selon l'auteur, difficile à établir dès lors que l'opérateur, du fait de la nature même de son activité, est tenu de respecter un très grand nombre de règles de sécurité, de maintenance et de diffusion de l'information. Par ailleurs, les victimes (extérieures à l'entreprise) ne contrôlant pas la prise de risque de l'opérateur à une date donnée³¹, nous sommes typiquement face à une externalité négative. Le fait que l'agent économique à l'origine de cette externalité soit aussi l'agent qui paie pour la compensation éventuelle n'est pas contraire à la théorie économique relative à la gestion des externalités.

Toutefois, une assurance au tiers suppose également que l'assureur acquiert plus facilement l'information concernant les activités de l'agent à l'origine du risque à couvrir que dans un contexte où il s'adresserait à la victime potentielle. Or, dans le cadre du nucléaire, nous avons déjà évoqué la question du secret-défense, qui exacerbe le problème du risque moral. Le manque d'information dont

³⁰ Faure (1995) parle de cartel.

³¹ Il est utile de préciser la dimension temporelle ici car nos propos peuvent être discutés si on les replace dans une perspective de durée. En effet, les agents économiques, notamment les citoyens, ont un rôle à jouer dans les directions prises par leur gouvernement en matière énergétique. Ils le jouent en votant, en faisant partie d'associations ou de groupes de pression par exemple. Ici, nous considérons la prise de décision à l'intérieur de l'entreprise et une fois qu'une politique énergétique est arrêtée.

peut souffrir l'assureur peut empêcher la mise en place d'un contrat d'assurance adéquat, sans que la victime potentielle puisse influencer les choix de l'opérateur.

En réalité, ces arguments ne peuvent pas plaider en faveur d'une assurance directe dans la mesure où l'assureur ne pourrait pas obtenir plus d'informations sur les risques dans une relation directe victime potentielle assurée / assureur. Il ne pourrait finalement pas proposer une tarification plus juste et ne serait pas non plus incité à réduire ses marges sur un marché de l'assurance nucléaire monopolistique.

Finalement, la législation permet d'obliger les opérateurs à offrir une couverture minimale aux autres agents économiques, malgré le prix de la couverture qu'ils jugent élevé. Un complément peut alors être envisagé, à l'aide notamment de la création de captives. La captive, créée par l'opérateur, peut également disposer d'informations sur les activités de prévention auxquelles d'autres n'accèdent pas. Il est important de noter qu'il ne s'agit pas ici de préconiser la création de captives afin de les substituer aux pools nationaux. Au contraire, il s'agit de mettre en avant les avantages que l'on peut retirer d'un système dans lequel les deux types de couverture sont complémentaires. Ce point est maintenant discuté plus en détails.

2.2. L'assurance du risque nucléaire : Vers une complémentarité pool / captive

Dans cette section, nous allons décrire les principaux véhicules de couverture actuellement utilisés par l'industrie nucléaire pour couvrir notamment la responsabilité civile et analyser leur optimalité au regard des instruments de couverture alternatifs. Cette question s'inscrit dans une problématique plus générale de la proportion d'un risque qu'une entreprise devrait retenir au sein de son organisation. Ce sera l'occasion d'aborder le véhicule de rétention par excellence que constituent les captives avant d'appréhender leur utilité dans le secteur particulier de l'industrie nucléaire.

a) Stratégies de rétention du risque

Le recours aux captives s'inscrit dans une problématique plus générale de la part du risque qu'une société ne souhaite pas – ou ne peut pas - transférer à un tiers. Cette rétention du risque peut être planifiée ou subie. Dans ce dernier cas, la société a mésestimé l'impact d'un risque ou ne l'a simplement pas identifié.

Quels sont alors les facteurs influençant le choix d'une *rétention de risque planifiée* ? Le facteur essentiel tient au type de risque auquel l'entreprise est confrontée. S'il s'agit d'un risque qui fait partie du cœur du métier de l'entreprise ou *risque central*³², l'entreprise s'estime en position pour le porter et le gérer de manière à dégager des rendements excédentaires. S'il s'agit d'un risque non central, l'entreprise préfère le transférer pour se concentrer sur ses cœurs de compétence. Une autre manière de distinguer un risque central d'un risque périphérique est de l'aborder sous l'angle informationnel. Si

³² Il s'agit d'une traduction approximative de *core risk*.

l'entreprise perçoit qu'elle détient un avantage informationnel sur certains risques, elle va choisir de le conserver parce qu'elle estime en connaître les distributions. Si, en revanche, elle estime que comparativement elle est peu informée, elle décidera de le transférer. On retrouve la distinction classique entre risque et incertitude. En réalité, définir un risque central est délicat et dépend essentiellement des préférences des actionnaires. Ainsi Tufano (1996), en étudiant la gestion des risques dans l'industrie d'extraction de l'or, a montré qu'il n'y a pas de règle pour déterminer si une entreprise va se couvrir contre les variations du prix de l'or. En réalité, le choix de couvrir ou non dépend essentiellement des préférences des actionnaires. Ainsi, il revient à chaque société de déterminer quel(s) risque(s) les actionnaires souhaitent couvrir ou non.

La décision de rétention peut aussi être appréhendée à partir de la distribution des pertes. Si le risque est de type catastrophique – faible probabilité et pertes importantes – l'entreprise préfère souvent le transférer. Si les pertes sont faibles, le risque est généralement retenu au sein de la firme. Dans ce dernier cas, on peut affiner la politique de rétention qui sera financée *ex ante* si la fréquence est élevée³³ ou financée une fois que la perte se réalise (financement *ex post*) si la fréquence des pertes est faible.

Les captives font clairement partie des stratégies adaptées aux risques dont le financement de la couverture est assuré *ex ante*, avant que le sinistre ne se déclare. Si l'on reprend la typologie de Culp (2001), il existe quatre grands types de véhicules ou d'instruments de couverture qui garantissent un financement *ex ante* d'un risque retenu au sein d'une firme :

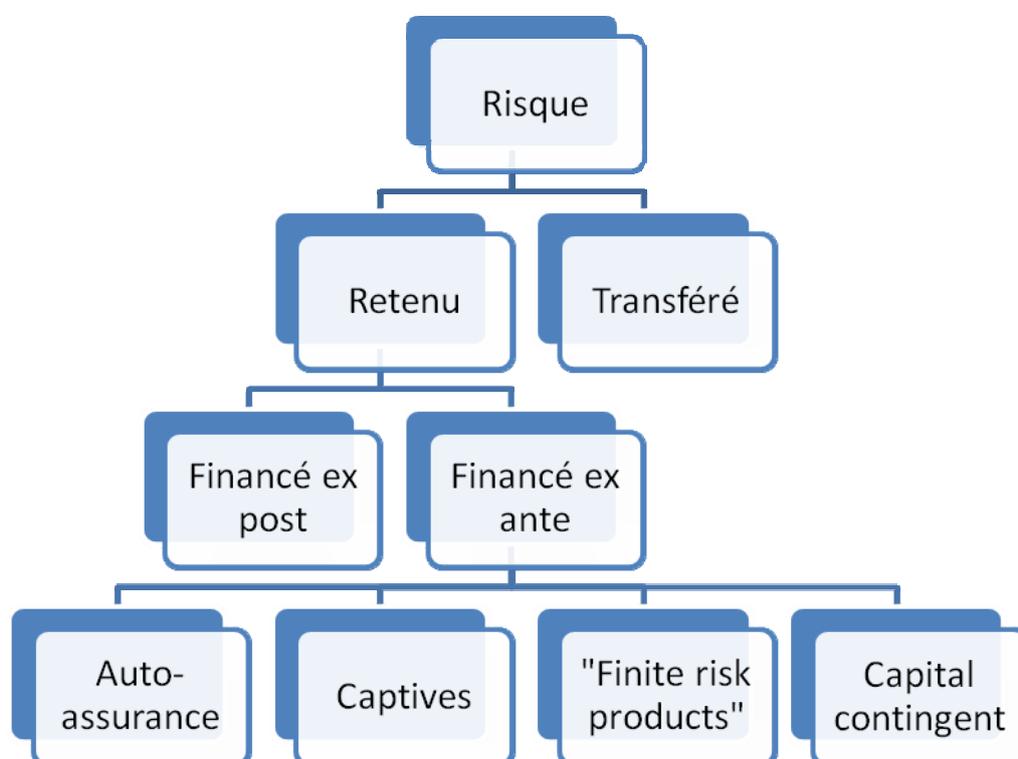


Figure 1 : Véhicules de rétention du risque, Culp 2001

³³ Des fonds spécifiques sont alors alloués à certains risques.

b) Les captives : définition et intérêts

*** Origines**

Elles existent implicitement depuis les années 1870, sous la forme de P&I Clubs³⁴. L'essor véritable date néanmoins des années 1960 dans les Bermudes. Deux raisons principales expliquent ce développement : les primes élevées exigées par les sociétés d'assurance et les difficultés pour obtenir de l'assurance pour les dommages aux biens. Plus de 40% des grandes sociétés américaines détiennent une ou plusieurs captives.

*** Définition**

Une captive est une compagnie d'assurance (« bona fide insurance »³⁵) ou une compagnie de réassurance. Ses activités sont d'abord apportées et contrôlées par ses propriétaires. Ces assurés/propriétaires participent au contrôle des souscriptions, de l'indemnisation et de la politique d'investissement. Schématiquement, les ressources et les flux générés par la captive peuvent être représentés comme suit :

³⁴ P&I signifie Protection and Indemnity. Il s'agit d'une mutuelle, d'un « club », qui fournit une auto-assurance collective à tout ses membres. Ces clubs assurent la responsabilité civile au tiers au titre des propriétaires ou gérants de navires qui en sont les membres. L'un des deux avantages essentiels de cette structure réside dans le calcul des primes qui se fait coûtant puisque le club ne réalise pas de profit. En particulier, lorsque les indemnisations sont plus faibles en raison de faibles sinistres, une partie des primes est reversée aux membres du club. L'autre avantage principal, qui prévaut également pour les captives, est le contrôle de la politique de souscription et d'investissement.

³⁵ « Bona fide » signifie de bonne foi. Ici, cela implique que la captive n'est pas conçue comme une coquille vide à des fins d'évasion fiscale. En particulier, les primes doivent être raisonnables (« arm's length » ou conditions normales de marché) par rapport au risque encouru.

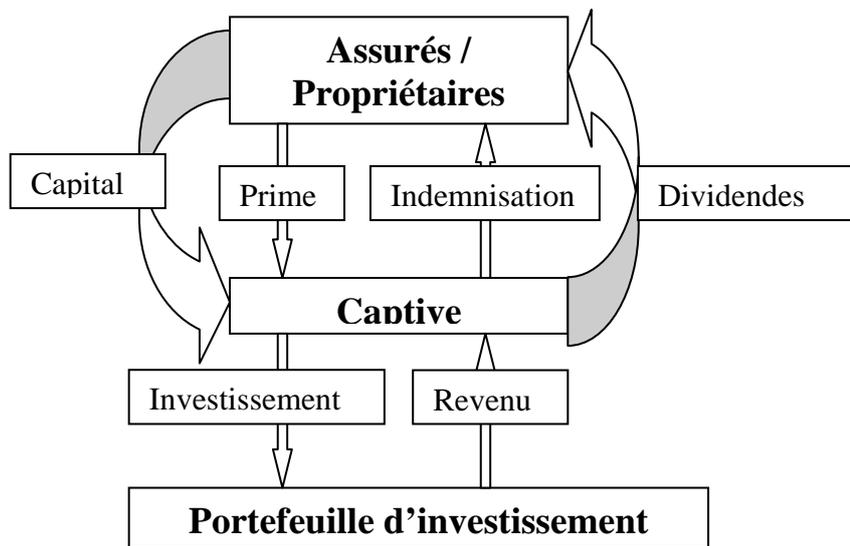


Figure 2 : Flux financiers d'une captive, Culp 2001

Ainsi, une captive d'assurance peut être assimilée à une société d'assurance classique. Elle s'en distingue par les preneurs d'assurance qui sont les sociétés du groupe auquel appartient la captive. La captive peut également jouer le rôle de réassureur du groupe :

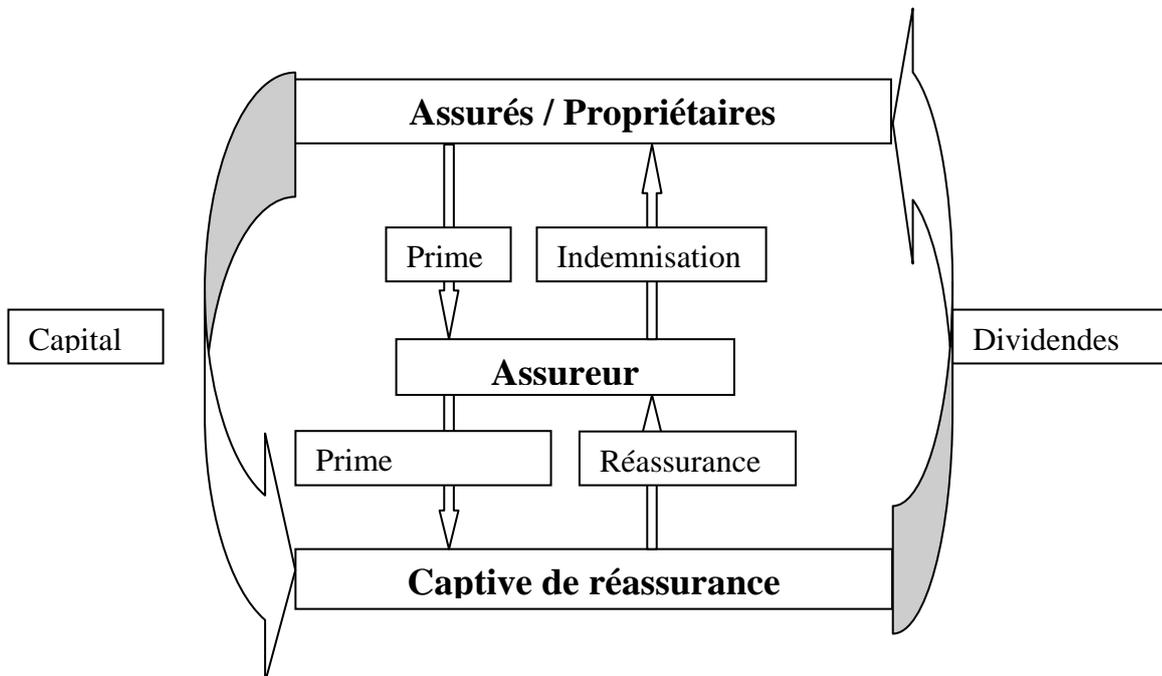


Figure 3 : Captive de réassurance, Culp 2001

*** Captives, auto-assurance et autres véhicules de rétention de risque préfinancée :**

Si l'on reprend la typologie des véhicules de rétention de risque, les captives et l'auto-assurance sont guidées par des principes très similaires. Elles se distinguent néanmoins par la création d'une

organisation séparée. Ainsi, l'auto-assurance renvoie à toute forme organisée de rétention du risque préfinancée qui implique une structure de transfert de risque de type assurance sans qu'elle ne nécessite la mise en place d'une organisation séparée. Si l'auto-assurance fait appel à une filiale détenant le statut de société d'assurance ou de réassurance, il s'agit alors d'une captive.

La forme la plus classique d'auto-assurance consiste à mettre des capitaux en réserve. Toutefois, ce mécanisme ne fonctionnera que si deux conditions principales sont remplies. Les réserves doivent être dédiées exclusivement à la couverture de risques bien spécifiés grâce à la rédaction de clauses interdisant tout usage alternatif. D'autre part, la firme doit faire face à un risque suffisamment homogène de sorte que les engagements futurs à travers les pertes supportées soient raisonnablement stables et prévisibles.

Parmi les autres véhicules de rétention préfinancée, on retrouve ce que l'on désigne par capital contingent. Il relève de tous les instruments de financiers dont les paiements sont tributaires de la réalisation d'un sinistre. On y retrouve notamment les cat bonds (obligations sur catastrophe naturelle), les options sur catastrophe naturelle, certains SWAPS. Ces instruments permettent le recours aux extraordinaires possibilités de couverture qu'offrent les marchés financiers lorsque les véhicules traditionnels d'assurance sont indisponibles ou trop onéreux. Tyran et Zweifel (1993) estiment que cette financiarisation de la couverture dans le secteur nucléaire permettrait d'augmenter considérablement la couverture du risque nucléaire et de réduire les externalités négatives. A ce jour, néanmoins, ces instruments ne sont pas utilisés pour couvrir le risque nucléaire. Leurs limites sont considérées dans le dernier paragraphe de ce travail.

*** Les différents types de captives**

Outre la distinction par l'objet – assurance ou réassurance – déjà évoquée, on peut distinguer les captives suivant leur nombre de propriétaires ou parents.

Lorsqu'il s'agit d'une captive d'assurance avec un seul parent, ce parent avance des fonds internes ou procède à une émission externe pour acquérir la totalité du capital de la captive. Les fonds sont ensuite investis dans des actifs financiers. Les primes sont versées à la captive au titre des risques que le parent souhaite retenir ou auto-assurer. La captive est enregistrée comme compagnie d'assurance. Les primes couplées au capital versé à la création de la captive servent à alimenter les réserves qui serviront à honorer les pertes encourues par le parent. Notons que la captive peut être gérée directement par le parent, par la captive elle-même ou par des sociétés spécialisées – sociétés d'assurance ou de réassurance telles que Zürich Financial ou courtiers tels que Marsh ou Aon.

L'objectif de captives multi-parents est de bénéficier de la diversification inhérente à la répartition des risques sur plusieurs sociétés. Leur constitution répond à la nécessité de couvrir des risques générant des pertes sporadiques mais importantes. Elles permettent alors de lisser dans le temps les pertes subies par chacune des sociétés parentes. Elles sont souvent mises en place par des sociétés appartenant à une même industrie.

Notons enfin que certaines sociétés, ne disposant pas des fonds nécessaires pour constituer une captive, peuvent avoir recours à une structure similaire à une captive multi-parent mais dont le capital

n'est pas détenu par les sociétés parents³⁶. L'actionnaire principal est généralement une compagnie d'assurance ou un courtier en assurance qui gère les risques au titre de leurs clients. Pour chacun d'entre eux, est constitué un compte spécifique sur lequel sont créditées les primes versées par le client et sont ponctionnés les dédommagements.

*** Intérêts à constituer une captive**

Les deux principaux avantages d'une captive généralement avancés relèvent d'une part, de la réduction et de la stabilisation des coûts et, d'autre part, de l'accès facilité au marché de la réassurance. Ces avantages doivent être appréhendés sous l'angle de la théorie de la structure du capital et des théories informationnelles pour en expliciter leur origine et en mesurer leur portée effective.

De fait, nous avons montré qu'une stratégie de rétention de risque est la plus adaptée lorsqu'une société a un historique de pertes favorable ou lorsque les pertes espérées peuvent être estimées avec une relative précision. Le ratio entre dédommagements et primes payées en sera d'autant plus faible justifiant la rétention du risque.

La constitution d'une captive peut aussi être bénéfique car elle permet d'éviter un recours à un financement externe après une perte importante (si le risque n'a pas été transféré *ex ante*). Celui-ci peut être particulièrement onéreux du fait des asymétries d'information et des coûts d'antisélection³⁷ en résultant. Dans le même ordre d'idées, le lissage des primes – indépendantes des soubresauts du marché de l'assurance - et leur échelonnement font que la captive permet d'améliorer la gestion de trésorerie de la société parente. La trésorerie bénéficie aussi du reversement des dividendes de la captive si l'historique de pertes de cette dernière est favorable alors qu'à travers une stratégie de transfert de risque, la société d'assurance conserverait les fonds.

L'accès facilité au marché de la réassurance ou les primes de risque plus faibles obtenues découlent directement de la constitution de la captive. Celle-ci implique souvent des relations de long-terme et donc la possibilité pour la société de réassurance de bénéficier des revenus durables. Le fait que la société parente retient une partie importante du risque, à travers sa captive, permet également de réduire les problèmes de hasard moral avec le réassureur puisque celui-ci sera moins préoccupé par des actions cachées qui augmenteraient leur exposition.

Les captives permettent également de réduire les coûts d'agence entre actionnaires et dirigeants. Les fonds servant à constituer le capital de la captive et les primes versées sont dédiés spécifiquement à la gestion des risques. Ils ne peuvent donc pas être détournés par les dirigeants à des fins propres – acquisition de concurrents ou dépenses somptuaires. Ils réduisent de fait ce que Jensen désigne par les cash flow libres et par voie de conséquence le risque de surinvestissement est atténué.

³⁶ Une telle structure est désignée par 'rent-a-captive'.

³⁷ Les coûts d'antisélection ou d'autosélection apparaissent en cas d'asymétrie d'information entre un acheteur et un vendeur – ici un souscripteur et un émetteur – qui empêche le vendeur de distinguer un bon produit d'un mauvais – ou une société saine d'une société en difficulté. L'asymétrie peut être dissipée ou atténuée en attribuant des garanties au produit vendu ou en émettant un signal favorable sur la qualité de l'émetteur.

La constitution d'une captive peut également servir de signal crédible sur la volonté d'une firme de prendre au sérieux sa politique de couverture des risques. Cette crédibilité, si perçue positivement par les marchés financiers, lui confère un avantage compétitif par rapport à ses concurrents.

Les arguments développés jusqu'ici en faveur de la constitution d'une captive tirent tous leur source de l'asymétrie d'information prévalant entre une firme et la société d'assurance ou de réassurance ou entre différents ayant-droits de la firme. Des considérations plus simples peuvent entrer en jeu même si elles ne sont pas suffisantes par elles-mêmes pour justifier la création d'une captive. Ainsi, les aspects fiscaux ne sont pas négligeables. Certains avantages sont liés à la fiscalité des sociétés d'assurance qui permet de constituer des réserves non imposables. Mais surtout, les primes payées sont déductibles fiscalement et l'imposition des revenus des placements d'une société d'assurance est différée. Notons encore que le choix de la domiciliation n'est pas anodin puisque des fiscalités propices aux captives sont proposées dans plusieurs juridictions off-shore.

c) Complémentarité pool/captive dans le secteur nucléaire

Après avoir développé les arguments en faveur de la constitution d'une captive, nous allons les confronter à la réalité de la couverture des risques du secteur nucléaire. Force est de constater que si le secteur a mis en place des captives en Europe et aux Etats-Unis, l'essentiel de la couverture est assuré par des pools de société d'assurance. Quelles sont alors les bénéfices d'une coexistence de ces deux formes de couverture dont les mécanismes sont a priori très éloignées l'une de l'autre ?

**** Utilités et limites respectives des pools d'assurance et des captives dans le secteur nucléaire***

La constitution de pools d'assurance présente plusieurs avantages.

Chaque membre d'un pool connaît exactement sa part de contributions en cas d'accident nucléaire. Cette part est strictement limitée grâce à la réassurance auprès des autres pools. Chaque membre est donc prêt à couvrir des montants plus élevés augmentant ainsi la capacité globale du secteur. Par ailleurs, les contrats de réassurance sont établis directement entre les pools nationaux sans intermédiaire. Les commissions chargées sont de l'ordre de 7,5% contre une moyenne de 30% pour le secteur traditionnel de la réassurance (voir Reitsma (2007)).

Des économies d'échelle sont réalisées à travers la concentration et les échanges d'information. Le haut niveau de technicité nécessaire pour le contrôle de l'activité nucléaire fait que seule une organisation centralisée telle un pool national peut amortir les coûts d'acquisition de l'information et de sa mise à jour.

L'expérience acquise par les pools, grâce aux compétences d'ingénieurs spécialisés, est mise à profit pour effectuer des inspections régulières pour contrôler les mesures de sécurité mises en place par les opérateurs nucléaires.

Ainsi, selon Reitsma, de nouveaux risques sont pris en charge par les pools seulement si les installations ont été inspectées au préalable par les équipes techniques du pool.

Les récents changements législatifs relatifs aux conventions internationales sur la responsabilité civile – qui conduisent à un quasi triplement du montant minimal à couvrir porté à 700 millions € - devraient, selon Reitsma, pouvoir être absorbés aisément par les pools.

La principale limite d'une stratégie de pool tient à la concentration du secteur de l'assurance du nucléaire qu'elle induit. De fait, si un opérateur français souhaite couvrir son risque de responsabilité civile, il devra nécessairement faire appel au pool français. Cette situation de quasi-monopole a des conséquences tant sur le niveau des primes versées que sur la capacité de couverture offerte par le secteur de l'assurance (à travers les pools). Ainsi, observe-t-on des montants de couverture maximale exigée par les législations nationales très variables entre pays faisant partie d'une même convention internationale. Il faut rappeler que si les Conventions de Paris et de Bruxelles fixent un seuil minimal de couverture obligatoire, ce seuil peut être relevé à l'entière discrétion du Parlement d'un pays signataire. De fait, la responsabilité civile de l'opérateur est illimitée en Suisse, en Allemagne et au Japon alors qu'elle s'aligne sur le montant minimal exigé par les Conventions internationales dans de nombreux pays. Faure et Van Den Bergh (1990) ont montré que les pools nationaux pouvaient influencer directement le législateur dans la fixation des responsabilités des opérateurs. En s'appuyant sur le cas de la Belgique, ils mettent en lumière le travail de lobbying de Syban, le pool belge, afin de faire abaisser le seuil à des niveaux particulièrement faibles par rapport aux dommages causés par un accident de moyenne envergure.

Dans ce contexte de forte concentration sectorielle, les captives ont un rôle important à jouer pour accroître la concurrence et faire baisser les primes. Leur poids actuel dans le domaine de la responsabilité civile est encore relativement limité : la captive européenne EMANI assure jusqu'à 100 millions € en responsabilité civile pour un montant minimum obligatoire de 700 millions € par pays signataire suite aux derniers amendements des Conventions de Paris et de Bruxelles. Toutefois, le fait même que cette captive et la captive NEIL aux Etats-Unis aient pénétré le marché de la responsabilité civile nucléaire – chasse gardée des pools auparavant – a notoirement bousculé la pratique des calculs de primes. La tarification de celles-ci a baissé et les capacités de couverture ont augmenté grâce à cette concurrence accrue (voir Vanden Borre (2002).

L'avantage tarifaire offert par les captives s'explique par leur structure même comme nous l'avons démontré dans la section b). En contrepartie de la rétention totale ou partielle du risque, les membres de la captive touchent les dividendes ce qui revient implicitement à offrir une tarification à prix coûtant. De manière plus générale, le recours aux captives dans le secteur nucléaire se conforme aux arguments développés dans la section précédente. L'historique de pertes est effectivement très favorable pour les opérateurs occidentaux – sauf pour l'incident majeur de Three Mile Island – justifiant une politique de rétention qui permet de rapatrier vers les firmes parentes les primes qui n'ont pas été utilisées. La constitution des captives et les fonds versés au travers de la constitution du

capital et du versement des primes, a permis de dédier ces sommes à la gestion des risques et non à d'autres fins, comme la croissance externe par exemple, réduisant ainsi le risque de surinvestissement et les conflits actionnaires/dirigeants au sein des opérateurs. Enfin, la volonté d'afficher une politique de couverture des risques ambitieuse par le recours aux captives est un signal d'autant plus important (et crédible) que le secteur fait de manière régulière l'objet de critiques, émanant d'associations écologiques ou autres, sur l'insuffisance des mesures de sécurité et sur les risques qu'induisent l'exploitation de l'énergie atomique.

En revanche, l'utilisation des captives dans le secteur nucléaire est en contradiction avec l'argument développé plus haut, selon lequel une stratégie de rétention planifiée et préfinancée est adaptée à des risques dont la fréquence est élevée mais de faible magnitude. Ce point mérite néanmoins d'être nuancé. En effet, toutes les captives du secteur nucléaire sont de type multi-parent. La mutualisation qui en découle entraîne nécessairement un lissage des primes, même si évidemment un incident majeur affecterait dramatiquement tous les opérateurs du secteur. Du fait de cette dernière caractéristique, il est essentiel de considérer d'autres formes de couverture, qui pourraient compléter l'assurance par les pools et les captives en cas de catastrophe.

d) Couvertures alternatives

Faure et Skogh (1992) ont proposé la rédaction d'une **nouvelle convention internationale** introduisant la responsabilité illimitée *ex ante* de l'opérateur mais qui, en cas d'accident, serait plafonnée. Un fonds financé par l'ensemble des producteurs à travers le monde permettrait d'assurer les indemnités jusqu'à ce plafond. Chaque producteur et membre du fonds garantirait un montant proportionnel par exemple à sa production. Ainsi, si un accident survient sur un site d'un membre du fonds, tous les producteurs seraient mis à contribution à hauteur de leur part de production par rapport à la production totale. Notons qu'une telle architecture est déjà appliquée depuis 3 décennies pour couvrir le risque de pollution par les hydrocarbures dans le transport maritime grâce aux conventions internationales régissant la responsabilité civile des armateurs et des affréteurs. Ainsi, les Fonds internationaux d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures (IOPC Fund ou FIPOL) sont alimentés par l'ensemble des importateurs de pétrole appartenant aux pays signataires des conventions interventions et servent à indemniser les victimes des marées noires.

La promulgation d'une telle convention pour couvrir le risque de responsabilité civile du nucléaire aurait plusieurs avantages indéniables. Le plafond de couverture serait augmenté très sensiblement et l'indemnisation serait rapide grâce à la disponibilité du fonds. Les externalités seraient fortement réduites et induiraient une prise en charge plus active du risque que génère l'activité nucléaire. En quelque sorte, la convention entraînerait une responsabilité économique collective du secteur.

Cette proposition, pour intéressante qu'elle soit en terme d'accroissement substantiel de la capacité d'indemnisation, souffre néanmoins d'un écueil majeur qui prévaut également pour le FIPOL (voir Schmitt et Spaeter (2007a)). En effet, les contributions à un tel fonds en cas d'accident nucléaire dépendent du niveau de production d'un opérateur et non de la qualité des mesures de sécurité entreprises. Aucune incitation directe en faveur de la protection de l'environnement et des hommes n'est induite au niveau d'un opérateur individuel. Sauf à mettre en place une autorité de régulation de contrôle réciproque pour tous les membres contributeurs du fonds, le risque nucléaire reste partiellement internalisé.

*** Les *Cat linked securities***

Le risque nucléaire fait partie de la catégorie des risques majeurs ou catastrophiques, du fait notamment de sa faible probabilité de réalisation (pour les accidents graves) et des énormes conséquences monétaires et non monétaires qu'un accident peut générer. Les marchés financiers ont fait preuve d'une innovation certaine ces dernières années pour proposer des actifs adaptés à la couverture de tels risques. En particulier, des *cat bonds* sont proposés depuis 1996 sur le CBOT. Dans le même esprit, les investisseurs peuvent acquérir des *cat options* et, plus récemment, de nouveaux produits tels que les ILW (*Industry Loss Warranties*) ont vu le jour. La question que l'on peut alors se poser est la suivante : ces titres s'échangeant sur des marchés mondialement intégrés, entre de nombreux acheteurs et vendeurs, ne seraient-ils pas plus intéressants en matière de couverture que les captives, qui restent des organisations intrinsèques à la firme ?

Pour y répondre, il est utile de discuter des avantages et des limites de ces instruments.

La *cat bond* permet à celui qui l'émet (ici, l'opérateur) d'emprunter un capital qu'il placera et fait office de garantie en cas d'accident. Si un accident survient, l'opérateur est autorisé à ne pas rembourser ce capital. En échange, l'investisseur fixe un taux d'intérêt plus élevé que dans le cas d'une obligation classique.

Dans le même esprit, des ILW (*Industry Loss Warranties*) sont également cotés. Ces actifs fonctionnent comme une *cat bond*, mais leur durée de vie ne dépasse pas l'année, contrairement aux *cat bonds*. Par ailleurs, ils ne sont pas considérés comme de la dette dans le bilan de l'entreprise et n'influencent donc pas (directement) le ratio dette/équité.

Une *cat option* fonctionne, au contraire, sur la base d'un indice support qui peut correspondre à un ratio entre le total des dommages créés par une catastrophe donnée et la somme des primes d'assurance enregistrées dans l'année par les assureurs de ce type de catastrophe. L'indice ne prend aucune valeur si aucun accident ne survient et prend des valeurs positives à chaque événement. L'acheteur de l'option (ici, l'opérateur) peut alors exercer l'option d'achat de l'indice dès lors que sa valeur dépasse son prix d'exercice, fixé au moment de la signature du contrat.

L'ensemble de ces actifs est classé dans la catégorie *cat-linked securities* (CLS dans la suite). Ils sont adaptés aux risques catastrophiques et leur support ne présente pas, *a priori*, de corrélation avec le risque de marché. Ceci doit favoriser leur liquidité dans la mesure où aucune prime de risque liée au risque de marché n'est exigée en théorie pour ce type d'actifs. Ils sont également susceptibles d'intéresser les gestionnaires de fonds par la diversification qu'elle génère du fait de leur décorrélation avec les autres classes d'actifs financiers.

*** Limites aux CLS dans le cadre du risque nucléaire**

Dans les faits, ces actifs ne rencontrent pas un franc succès. Certaines de leurs limites, exacerbées dans le cadre du risque nucléaire, peuvent expliquer la faible liquidité de ces titres. Il s'agit du facteur incertitude et de l'ambiguïté quant à l'avenir du secteur nucléaire, du risque moral et du risque de base. Nous avons vu dans la première partie que le fait de ne pas disposer d'un consensus sur les probabilités d'accident et, plus généralement, sur les distributions des risques peut limiter les transactions entre acheteurs et vendeurs. Associée à l'incertitude sur les risques futurs (liés à la gestion des déchets et aux possibilités de les recycler plus tard), cette ambiguïté ne plaide pas en faveur de l'utilisation de CLS pour la couverture du risque nucléaire.

La question du risque moral est également avancée dans la première partie comme un élément qui ne facilite pas les transactions d'assurance. Ici, elle se réfère précisément au fait que l'opérateur peut avoir intérêt à annoncer un montant de dégâts plus élevés que le montant réel si l'événement (*trigger*) qui déclenche le non paiement du capital dans le cadre de *cat bonds* ou l'exercice de l'option dans le cadre de *cat options* est exclusivement la survenue d'un accident dans la centrale nucléaire dont il a la responsabilité. Pour pallier ce problème, il peut alors être opportun de définir un indice par rapport aux pertes de l'industrie, et non pas seulement de l'opérateur. Cette opération fait alors apparaître un risque de base dans la mesure où il n'y aura pas parfaite corrélation entre le risque spécifique à la firme et celui, agrégé, de l'industrie. Ce risque de base implique alors une couverture partielle du risque de l'entreprise et une incitation à investir dans des mesures de prévention afin de réduire le risque résiduel.

La production d'énergie nucléaire est une activité à coûts fixes élevés, qui nécessite des investissements lourds, des activités de maintenance et de prévention continues et pointues. De ce fait, il s'agit d'une activité qui s'organise au sein d'une structure de marché contestable, mais de type oligopolistique si l'on raisonne au niveau d'un continent par exemple. Lorsqu'un accident survient dans une centrale nucléaire et qu'il génère des dommages suffisants pour que le capital d'une *cat bond* ne soit pas remboursé par son détenteur ou que l'option d'une *cat option* devienne exerçable par son acheteur, il a une forte probabilité d'affecter significativement l'indice de l'industrie. Autrement dit, du fait du caractère catastrophique de la portée des rayons, de la propagation tant dans l'espace géographique que dans l'espace temporel des atteintes à la santé

humaine et de l'opinion publique sévère dans ce contexte, la survenue d'un accident peut significativement affecter la valeur de toutes les entreprises de l'industrie du nucléaire³⁸.

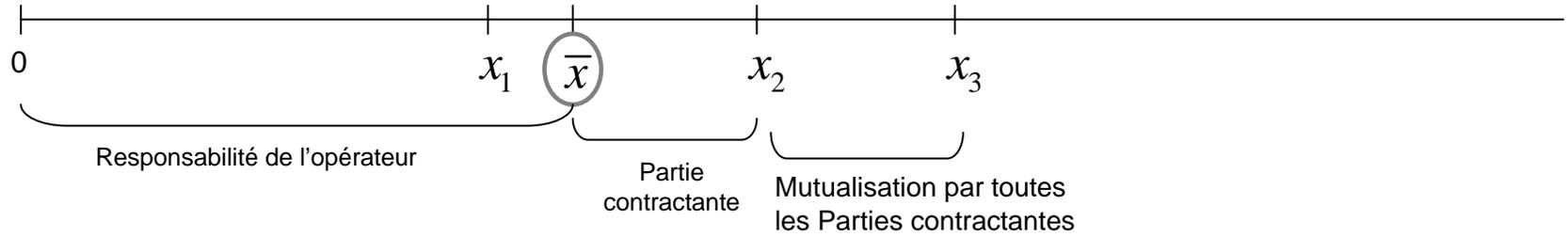
Concernant toujours les actifs sur indice, il est important de noter encore que ce type d'actif financier ne permet pas, à lui seul, de répondre aux exigences des conventions internationales. Les 700 premiers millions euros de dommages doivent, en effet, bénéficier d'une couverture complète de la part de l'opérateur. Si sa couverture, via des investissements sur les marchés des capitaux, est partielle, il devra la compléter.

Enfin, l'indépendance théorique entre le portefeuille de marché et les actifs dérivés dont le support concerne des montants de dommages dus à une catastrophe n'est, dans les faits, pas toujours avérée. En effet, des catastrophes telles que l'ouragan Katrina ou la tragédie du 11 septembre ont ébranlé les marchés mondiaux après que les mécanismes de réassurance aient été largement sollicités par les assureurs. Cette corrélation qui peut être strictement positive lorsque la couverture d'un risque catastrophique fait appel aux marchés financiers peut encore être avancée pour expliquer le manque d'attrait de titres dérivés qui ne servent qu'à couvrir le risque catastrophique. Les cat bonds, cat options et options sur indice dans leur version originelle n'ont pas été construits pour prendre également en compte le risque que le portefeuille de l'investisseur se détériore suite à une chute des cours boursiers due à la catastrophe (Barrieu et Loubergé, 2006). Compte tenu des conséquences sanitaires et environnementales d'une catastrophe nucléaire, il est pourtant raisonnable d'envisager que les mécanismes de la réassurance soient également fortement sollicités, affectant ainsi les marchés financiers et affaiblissant encore la capacité des CLS à couvrir un tel risque.

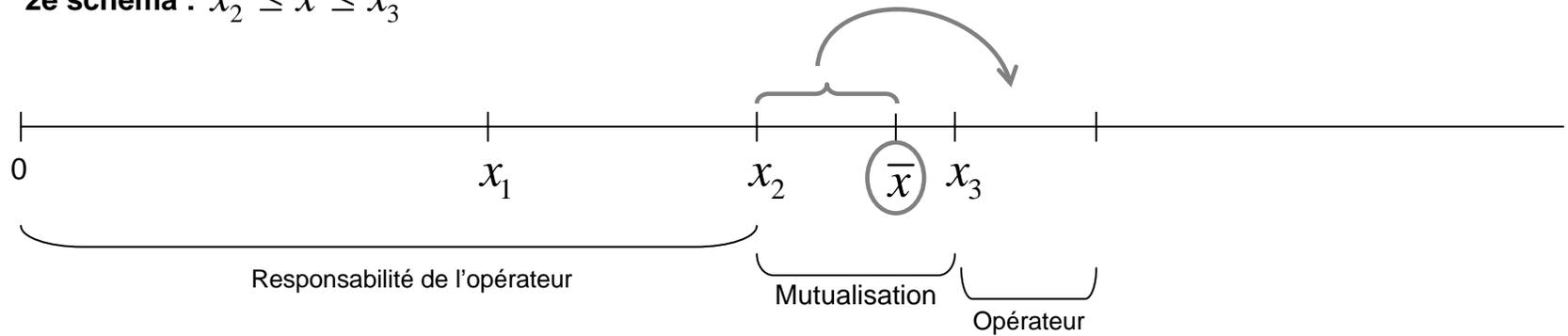
Finalement, les arguments développés dans cette section nous amènent à conclure qu'à l'heure actuelle, les CLS ne sont pas adaptés à la couverture du risque nucléaire et que la captive, couplée à l'assurance offerte par les pools nationaux, reste la voie privilégiée.

³⁸ L'accident de Three Mile Island et celui de Tchernobyl n'ont pas seulement « marqué les esprits ». Ils ont également eu un réel impact sur les politiques énergétiques des pays à partir de ces dates.

1^{er} schéma : $\bar{x} \leq x_2$



2e schéma : $x_2 \leq \bar{x} \leq x_3$



3e schéma : $x_2 \geq \bar{x}$

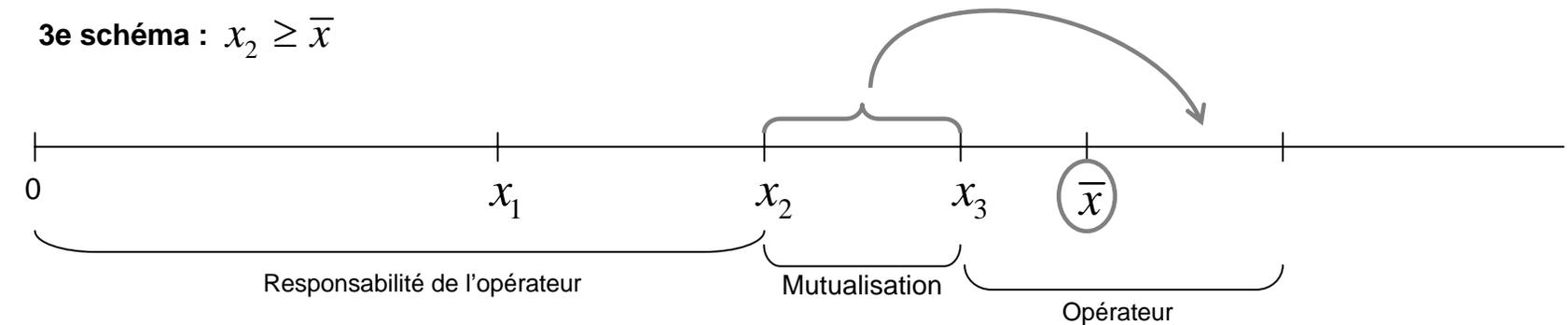


Figure 1. Schémas de responsabilité envisageables

Références citées

- Anderson D. [1998], «Development of Environmental Liability Risk Management and Insurance in the United States : Lessons and Opportunities», *Risk Management and Insurance Review*, 2, pp. 1-23.
- Barrieu P. et H. Loubergé, 2006, *Hybrid cat bonds*, mimeo HEC Lausanne.
- Arrow K.J. et A. Fisher, 1974, *Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility*. *Quarterly Journal of Economics* 88, 312-319.
- BERLINER B., 1982, *Limits of insurability of risks*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Borre Tom V., 2002, *Are nuclear operators liable and insured in case of an act of terrorism on a nuclear installation or shipment?*, April 26-27 2002 Symposium organised by PSR/IPPNW/Switzerland.
- Chesney M., Loubergé H. et S. Villeneuve, 2002, *Long term risk management of nuclear waste: A real options approach*, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 27, 157-180.
- Culp, C., 2001, *The ART (Alternative Risk Transfer) of risk management*, edition Wiley Finance.
- Dahlström K, J Skea and W Stahel, 2003, *Innovation, insurability and sustainable development: Sharing risk management between insurers and the state*, *The journal of risk and insurance*, vol. 50, n2 323-327.
- Doherty N. and C. Smith, 1993, *Corporate insurance strategy: the case of British Petroleum*, *Journal of Applied Corporate Finance*, vol.6.
- Faure M. and G. Skogh, 1992, *Compensation for damages caused by nuclear accidents: a convention as insurance*, *The Geneva Papers on Risk and Insurance Vol.17*, 499-513.
- Faure M. et Van Den Bergh, 1990, *Liability for nuclear accidents in Belgium from an interest group perspective*, *International review of law and economics*, 241-254.
- Faure M., 1995, *Economic models of compensation for damage caused by nuclear accidents: some lessons for the revision of the Paris and Vienna Conventions*, *European Journal of Law and Economics*, 21-43.
- Faure M., 2001, *Environmental damage insurance in theory and practice*, *The law and economics of environmental policy: a symposium*,.
- Froot K., 2001, *The market for catastrophe risk: a clinical examination*, *Journal of Financial Economics*, vol.60.
- Gollier C., 1996, «Vers une théorie économique des limites de l'assurabilité», *Revue d'Economie Financière*, 37, pp. 59–79.
- Gollier C., 2005, *Coûts de l'inassurabilité et coût de l'assurance*, *Revue d'Economie Financière* 80, 39-52.
- Gollier C., Proult D. et F. Thais, 2005, *Choice of Nuclear Power Investments under Price Uncertainty: Valuing Modularity*, *Energy Economics* 27, 667-685.

- Hansson I. and G. Skogh, 1987, Moral hazard and safety regulation, *The Geneva Papers on Risk and Insurance* Vol.12, 132-144.
- Henry, C., 1974, Investment decisions under uncertainty: the irreversibility effect, *American Economic Review*, 64, 1006-1012.
- Heyes A. and C. Liston-Heyes, 2000, Capping environmental liability : the case of north american power, *The Geneva Papers on Risk and Insurance* Vol.25 n.2, 196-2002.
- Meyers G. and J. Kollar, 1999, Catastrophe risk securitization : insurer and investor securitization, Insurance Services Office Inc.
- Raviv, A., 1979, «The Design of an Optimal Insurance Policy», *American Economic Review* 69, 84-96.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2002, Insurance and financial hedging of oil pollution risks, rapport pour l'Institut Français de l'Energie.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2005a, «Hedging Strategies and the Financing of the 1992 International Oil Pollution Compensation Fund», Document de Travail du BETA n°2005-12, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2005b, «Coverage of Large Risks: Theoretical Analysis and Application to Oil Spills», miméo BETA, ULP, Strasbourg 1.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2005c, « Improving the Prevention of Environmental Risks with Convertible Bonds », *Journal of Environmental Economics and Management* 50(3), 637-657.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2007a, « Coverage of Large Risks: Theoretical Analysis and Application to Oil Spills », miméo BETA/LARGE.
- Schmitt A. et S. Spaeter, 2007b, « Instruments de couverture du risque nucléaire et impact des législations internationales », en révision pour la *Revue Economique*.
- Shavell, S., 1979, On Moral Hazard and Insurance, *Quarterly Journal of Economics* 93(November), 541-562.
- Spaeter S., 2004, « L'incidence des régimes de responsabilité environnementale sur les comportements de prévention et d'assurance des firmes », *Revue Économique* 55(2), 227-245.
- Treblcock M. and R. Winter, 1997, The economics of nuclear accident law, *International review of law and economics*, 215-243.
- Tufano P., 1996, Who Manages Risk? An Empirical Examination of Risk Management Practices in the Gold Mining Industry, *Journal of Finance*, septembre, 1 097–1 137.
- Tyran J-R and P. Zweifel, 1993, Environmental risk internalisation through capital markets (ERICAM): the case of nuclear power, *International review of law and economics*, 431-444.
- Viscusi W., 1995, Insurance and Catastrophes: the changing role of the liability system, *The Geneva Papers on Risk and Insurance* Vol.20, 177-184.
- Weese S., 1983, Another look at "nuclear liability after Three Mile Island, ", *The journal of risk and insurance*, vol. 50, n°2, 323-327.
- Zng L., 2000, On the basis risk of industry loss warranties, *Journal of Risk and Insurance*.

Articles de l'équipe écrits dans le cadre de ce projet

Broihanne M-H., Gabuthy Y. et M. Merli, (2007), « La perception du risque nucléaire : théorie et expérimentations », miméo Nancy-Université / Université Louis Pasteur.

Etner J, (2006), « Les risques associés à l'énergie nucléaire et leurs perceptions », miméo GAINS, Université du Maine et CES - Paris 1.

Etner J. et M. Jeleva, (2004), « Pessimism or optimism : A justification to voluntary contributions toward environmental quality », Document de travail Maison des Sciences Economiques, EUREQua, Série Verte n°2004.99, Université Paris 1.

Etner J., Jeleva M., Langlais E. et S. Spaeter, (2007), « Optimal decision on energy production with heterogeneous risk perceptions », miméo Nancy-Université / Université du Maine.

Schmitt A. et S. Spaeter, (2007b), « Instruments de couverture du risque nucléaire et impact des législations internationales », en révision pour la *Revue Economique*.

Conférenciers invités dans le cadre des deux conventions (J-A. Héraud et S. Spaeter)

1) 15.09.05 au BETA, Strasbourg

Gérard Rudolf, physicien, Directeur de recherche CNRS, (IReS, Cronenbourg),

→ Aspects techniques du nucléaire (production, déchets, indépendance énergétique, uranium, autres possibilités, ...)

2) 13.01.06 au BETA, Strasbourg

Peter Zweifel, économiste, professeur à l'Université de Zurich, président du *European Group of Risk and Insurance Economists*, 2005 – 2006.

→ Présentation de ses travaux, avec Yves Schneider, Titre "How much internalization of nuclear risk through liability insurance?"

3) 13.10.06 au BETA, Strasbourg.

Françoise Zonabend, sociologue à l'EHESS, Paris.

→ Présentation de ses travaux, Titre « Une approche anthropologique du nucléaire ».