

Séminaire ASN

SEMINAIRE PLURALISTE SUR L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE

VENDREDI 24 OCTOBRE 2014

COMPTE RENDU

S O M M A I R E

Avant-propos	3
Synthèse du séminaire	4
Ouverture du séminaire	7
PREMIERE PARTIE ANALYSE ECONOMIQUE DU RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE	9
Les probabilités d'accident nucléaire majeur : calcul et perceptions	10
Le coût du risque extrême : éléments d'analyse microéconomique	13
Modélisation économique et dommages dus à un accident nucléaire	16
DEUXIEME PARTIE LE CALCUL ECONOMIQUE FACE AU RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE ...	18
Pourquoi et comment internaliser le risque d'accident nucléaire.....	19
Face aux incertitudes de long terme, comment prendre des décisions socialement désirables	22
TROISIEME PARTIE BILAN ET PERSPECTIVES	24
Conclusion du séminaire.....	29
Ordre du jour	30
Liste des participants.....	31

Avant-propos

L'ASN a organisé, le 24 octobre 2014, un séminaire sur l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire. Ce séminaire pluraliste a réuni des économistes, des universitaires, des exploitants nucléaires, des représentants d'associations et des experts issus de la société civile.

Les objectifs du séminaire étaient de partager la connaissance sur les diverses dimensions de l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire et d'identifier les axes de recherche permettant de développer ou d'améliorer ces connaissances.

Dans le cadre de sa mission d'information, l'ASN s'est engagée à ce que le compte rendu de ce séminaire soit rendu public et fasse l'objet d'une note d'information sur son site Internet.

L'ASN va engager, dans le prolongement du séminaire, des actions pour promouvoir aux niveaux national et international le développement d'actions de recherche sur ce sujet.

Synthèse du séminaire

La journée a été introduite par Jean-Jacques Dumont et Jean-Christophe Niel (ASN) qui ont insisté sur l'importance de l'évaluation économique du risque nucléaire, question fondamentale, située à la croisée de deux préoccupations essentielles : d'une part, l'évaluation et la gestion post-accidentelle des situations d'accident nucléaire, déjà abordée dès 2005 par l'ASN dans le cadre du CODIRPA, et d'autre part la connaissance des enjeux économiques du risque d'accident nucléaire. Au-delà du caractère conflictuel, voire passionnel, de la question du risque nucléaire, il s'agit pour l'ASN d'un sujet d'analyse qui ne doit pas être éludé, mais qui est rendu particulièrement difficile par la pluralité des approches envisageables. Dans cette perspective, ce séminaire fait suite à un premier travail d'investigation réalisé pour l'ASN par Pierre Picard (Ecole Polytechnique) qui avait pour objectif de confronter les points de vue dans une perspective principalement méthodologique. C'est dans ce but qu'a été constitué le groupe de participants réunis pour ce séminaire, qui comprend des économistes, des « institutionnels » (IRSN, OCDE-AEN, représentants des ministères, exploitants), la société civile (associations, experts non-institutionnels, ANCCLI), des représentants des assureurs, du Fonds de Recherche AXA, et de l'Institut Louis Bachelier.

Le séminaire a été organisé en deux parties avec exposés et questions, consacrées respectivement à l'analyse économique du risque nucléaire et au calcul économique face au risque nucléaire, suivie d'une phase d'échanges entre les participants sur l'ensemble des points abordés.

La matinée était consacrée à l'analyse économique du risque nucléaire. François Lévêque (Ecole des Mines) a traité du calcul et de la perception de la probabilité d'accident nucléaire majeur. Au-delà de la vaine recherche d'une « vraie » probabilité d'accident nucléaire, François Lévêque a plaidé en faveur d'une démarche pragmatique visant à calculer les probabilités en combinant les données sur les accidents majeurs observés et les connaissances des ingénieurs de sûreté. Il a aussi souligné l'importance pour les décideurs publics et les autorités de sûreté de s'appuyer sur des probabilités calculées par des experts, et de ne pas se contenter de la perception de ces probabilités, celle-ci ayant une dimension subjective importante. Ce n'est que dans le contexte d'une autorité de sûreté indépendante, compétente, transparente et puissante que ces calculs peuvent être effectués avec la rigueur et l'objectivité nécessaires.

Patrick Momal et Ludivine Pascucci-Cahen (IRSN) ont présenté une analyse microéconomique du coût des risques extrêmes. Leur analyse vise à définir les déterminants de ce qu'ils appellent le « consentement à prévenir l'espérance de perte », c'est-à-dire le multiplicateur qui doit être appliqué à l'espérance de perte pour obtenir ce que le décideur serait disposé à payer pour supprimer le risque. Il s'agit d'une analyse qui vise à étendre la notion usuelle de « prime de risque » au cas d'un risque (comme celui d'accident nucléaire) dont la probabilité est certes faible, mais les dommages potentiels sont extrêmement élevés. Ces travaux visent à mettre en lumière la différence de nature entre la prévention des risques faibles pour lesquels on peut approximer la prime de risque par des méthodes classiques de calcul économique dans l'incertain, et la prévention des risques modérés et extrêmes où les préférences du décideur doivent être modélisées de manière totalement différente.

Geoffrey Rothwell (OCDE-AEN) a traité du coût social du risque d'accident nucléaire en se plaçant dans une perspective d'économie de l'assurance. Les études qui ont visé à évaluer ce coût social ont montré l'importance des hypothèses relatives à la distribution de probabilité des dommages et à la modélisation de l'aversion pour le risque. Parmi les questions de recherche qui devraient être traitées prioritairement, figure l'évaluation comparative des dommages suite aux accidents de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima, et surtout l'estimation d'une distribution de probabilité des dommages s'appuyant sur l'analyse bayésienne. Il convient aussi de réfléchir sur le choix d'une fonction de bien-être social, qui dépasse la simple agrégation des fonctions de bien-être individuelles, en tenant compte du coût social du capital. Enfin, il faudrait pouvoir étendre les règles du calcul économique public dans l'incertain au cas du risque d'accident nucléaire, et lui associer une réflexion sur ce que devraient être des mécanismes d'assurance optimaux dans un tel contexte de risques catastrophiques.

La première partie de l'après-midi a été consacrée à la question du calcul économique face au risque nucléaire. Pierre Picard a abordé la question de l'internalisation du coût d'accident nucléaire : pourquoi une telle internalisation et comment la mettre en place ? Il a d'abord rappelé que le risque nucléaire diffère des risques d'accidents usuels car il est imparfaitement mutualisable, imparfaitement diversifiable, parce qu'il a une dimension systémique, et que ses conséquences sont potentiellement catastrophiques et impactent le très long terme. Pour toutes ces raisons, on ne peut traiter du risque nucléaire avec les règles habituelles du calcul économique qui conduisent à négliger l'aversion pour le risque des individus au motif que les conséquences d'un accident seraient réparties sur un grand nombre d'individus. Pierre Picard a présenté un modèle qui montre l'importance du niveau de responsabilité des exploitants et des mécanismes d'assurance qui lui correspondent. Il en ressort que deux paramètres jouent un rôle crucial dans la couverture d'assurance optimale : le niveau d'aversion pour le risque des individus susceptibles d'être impactés par l'accident et le coût du capital qui devrait être adossé au mécanisme d'assurance. Pour des hypothèses raisonnables sur ces paramètres, le niveau de responsabilité des exploitants qui ressort de la révision de la Convention de Paris est très probablement nettement inférieur au niveau optimal qu'il conviendrait de mettre en place.

Christian Gollier (Ecole d'Economie de Toulouse) a traité de la question des décisions publiques face aux incertitudes de long terme. Son exposé visait principalement à mettre en perspective risque d'accident nucléaire et risque climatique, le second ayant selon lui un coût social plus grand que le premier. Il a souligné la difficulté qu'il y a à estimer une probabilité d'accident, et face aux incertitudes de long terme, il recommande un « principe de précaution raisonné » qui prendrait en compte à la fois l'inefficacité des mécanismes d'assurance, l'aversion à l'ambiguïté que celle-ci soit intrinsèque ou affectée par un apprentissage des probabilités dans un contexte dynamique, la prise en compte de valeurs d'option, à la fois pour la préservation du savoir-faire et pour le « learning by doing », ainsi que les biais de perception vers le pessimisme ou l'optimisme.

Toutes les présentations ont fait l'objet d'échanges abondants avec l'ensemble des participants, animés par Dominique Bureau (Conseil Economique pour le Développement Durable), d'abord sous forme de dialogue avec les conférenciers, puis en fin d'après-midi par une session ouverte au cours de laquelle les sujets ont été abordés de manière plus transversale.

La journée a été conclue par Jean-Christophe Niel. Celui-ci a souligné l'importance de plusieurs questions qui ressortent de ces débats. D'abord, **la question des données** : quelles données sont importantes pour la recherche ? Comment les partager ? Quelles données nouvelles devraient être rassemblées, notamment liées à la catastrophe de Fukushima ? Comment évaluer le coût d'un accident nucléaire ? Au-delà de cette

question des données, plusieurs sujets apparaissent : celle de **l'évaluation de la probabilité d'accident et de son évolution en fonction des changements de technologies** ; celle des écarts entre l'anticipation du risque d'accident et la réalisation effective de certains événements, et aussi celle de la perception des risques. Un autre sujet rassemble toutes les interrogations sur **l'aversion aux risques catastrophiques**. Le risque nucléaire nous conduit à réfléchir sur les risques extrêmes. Un rapprochement avec d'autres risques extrêmes serait intéressant à approfondir, comme par exemple le risque de crise financière comme cela a été suggéré. Ceci rejoint une troisième catégorie de sujets qui concernent **la modélisation de l'attitude vis-à-vis du risque et la mesure de l'aversion au risque**. Un quatrième groupe de sujets rassemble tout ce qui concerne **les mécanismes d'assurance, dans une perspective soit d'indemnisation soit de financement de ces mécanismes**. Enfin, **le rôle du régulateur et de ses imperfections** a été peu abordé au cours du séminaire, mais il renvoie à un ensemble de questions intéressantes et importantes pour la politique de sûreté nucléaire.

Pour l'ASN, deux idées fortes ressortent de ce séminaire sur lesquelles il serait important de progresser notamment du point de vue de la recherche en économie :

- Comment relier et rendre cohérentes l'approche probabiliste des études de sûreté et les approches qui mettent l'accent sur la perception des risques et sur l'aversion aux risques individuels ou collectifs ?
- Comment l'évaluation économique du risque nucléaire devrait-elle affecter les décisions économiques en matière de prévention, de régulation, d'indemnisation, d'assurance ou de financement ?

Ouverture du séminaire

Jean-Jacques Dumont

Commissaire de l'Autorité de sûreté nucléaire

En l'absence du président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), Pierre-Frank Chevet, en déplacement à Stockholm pour participer à une réunion des autorités européennes de sûreté nucléaire, Jean-Jacques Dumont, commissaire de l'ASN, souhaite la bienvenue aux participants.

Ce séminaire se trouve à la croisée de deux préoccupations importantes de l'ASN. La première préoccupation concerne **la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire**. L'ASN a souligné à maintes reprises qu'on ne pouvait pas exclure un tel accident quelles que soient les précautions prises. Dès 2005, à la demande du gouvernement, l'ASN a engagé une démarche pluraliste de réflexion au sein du Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle (CODIRPA), avec la publication fin 2012 des premiers éléments de doctrine et l'affirmation par le gouvernement et le CODIRPA de la volonté de poursuivre ces travaux pour les consolider, les enrichir, notamment en explorant de nouveaux scénarios, mais aussi des thèmes qui n'ont pas encore été abordés. Les aspects économiques figurent explicitement dans cet ensemble, qu'il s'agisse de l'évaluation des dommages à long terme ou, plus largement, des conséquences économiques et sociales d'un accident nucléaire et des contre-mesures à mettre en œuvre en phase post-accidentelle. Par ailleurs, et c'est la seconde préoccupation, même si l'ASN ne pratique pas d'analyse coûts-bénéfices, qui serait peu adaptée à sa mission de contrôle de la sûreté nucléaire ; il n'est pas indifférent, pour calibrer le mieux possible les prescriptions réglementaires, de **progresser dans la connaissance des aspects économiques du risque d'accident nucléaire**. C'est un élément de contexte tout à fait important.

En outre, ce séminaire est la manifestation d'une volonté forte de l'ASN de s'inscrire dans une perspective de renforcement de la recherche dans ce domaine. Il n'est pas question pour l'ASN de se transformer en organisme de recherche, ni-même de piloter la recherche. En revanche, il est essentiel pour l'ASN de participer aux réflexions en amont, de telle manière que des programmes de recherche prennent en compte les préoccupations de la sûreté nucléaire. C'est dans cet esprit que l'ASN s'est dotée d'un comité scientifique, dont deux membres participent au séminaire.

Jean-Christophe Niel

Directeur général de l'Autorité de sûreté nucléaire

Le risque d'accident nucléaire est un sujet conflictuel, voire passionnel ; mais, pour l'ASN, c'est un sujet « à l'agenda », particulièrement après l'accident de Fukushima, même si de nombreuses questions avaient été abordées, notamment dans le cadre du CODIRPA, avant cet accident. C'est un sujet qui mérite investigation, mais qui est rendu particulièrement ardu par la multitude des approches et des perspectives qui peuvent être retenues pour l'analyser. Un premier travail d'investigation a été réalisé par Pierre Picard, professeur d'économie à l'École Polytechnique pour l'ASN et il conduit à ce séminaire dont l'objectif est de confronter les points de vue sur l'analyse économique du risque d'accident nucléaire, avec une perspective principalement méthodologique.

L'ASN a pour principe de favoriser des échanges ouverts et pluralistes, que ce soit sur la gestion post-accidentelle déjà évoquée, mais aussi sur d'autres questions comme la gestion des déchets radioactifs ou les facteurs organisationnels et humains de la sûreté nucléaire. C'est ce qui a guidé la composition du groupe des participants au séminaire qui a deux grands objectifs : d'une part, échanger dans une perspective méthodologique sur l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire ; d'autre part, afin de conduire à des prolongements opérationnels, identifier des pistes de travail et des axes de recherche pour pouvoir progresser.

C'est dans ce but qu'a été constitué le groupe de participants réunis aujourd'hui qui comprend des économistes, des « institutionnels » (IRSN, OCDE-AEN, représentants de ministères, exploitants) ainsi que des représentants de la société civile (associations, experts « non institutionnels », ANCCLI), des assureurs, du Fonds de Recherche AXA et de l'Institut Louis Bachelier.

SESSION 1

ANALYSE ECONOMIQUE DU RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE

1. François Lévêque - « Les probabilités d'accident nucléaire majeur : calcul et perceptions »

L'évaluation économique du risque d'accident nucléaire majeur requiert d'estimer la probabilité d'occurrence d'un tel accident et le coût des dommages associés. La présentation porte uniquement sur le premier aspect, en abordant **deux questions** :

- quelle révision de la probabilité d'accident majeur la catastrophe de Fukushima-Daiichi entraîne-t-elle ?
- quels sont les effets des biais de perception du public en matière de probabilités d'accident nucléaire ?

On observe des écarts importants entre les probabilités d'accident nucléaire calculées dans les études probabilistes et celles qui semblent se déduire des observations : par exemple, des études probabilistes conduisent à une fréquence d'accident (supérieur à 4 dans l'échelle INES) tous les 50 000 années.réacteurs pour une fréquence observée d'un accident tous les 1500 années.réacteurs. Dès lors, **on est conduit à se demander si on peut appliquer la théorie des probabilités au risque d'accident nucléaire.**

Il convient tout d'abord de **distinguer les notions de risque, d'incertitude et d'incomplétude**. Dans le cas du risque, l'ensemble des états du monde est connu et chaque état a une probabilité connue. Le cas d'incertitude correspond à une situation où les états du monde sont connus, mais pas les probabilités de chacun d'entre eux. On peut ainsi ramener les situations d'incertitude aux situations de risque en faisant des hypothèses sur les probabilités inconnues (comme par exemple l'égalité des probabilités de deux états sur lesquels on ne dispose pas d'information *a priori*). Enfin, le cas d'incomplétude correspond à la situation où l'ensemble des états du monde n'est pas connu (tout ce qui peut arriver n'est pas spécifié et connu *a priori*). Le calcul des probabilités s'applique aux situations de risque et d'incertitude (c'est-à-dire au cas d'un monde sans surprises) mais pas aux situations d'incomplétude. Keynes, dans son *Traité des Probabilités* (1920) rejetait ainsi le recours au calcul des probabilités pour l'étude des phénomènes dynamiques et de changements rapides. Par ailleurs, comme l'ont montré les travaux d'économie expérimentale (notamment ceux de Daniel Kahnemann), il convient de distinguer les probabilités perçues de celles qui résultent d'un calcul rationnel. Enfin, il y a des écarts de divers ordres entre théorie et comportement, lorsqu'on étudie la décision rationnelle en univers incertain, comme par exemple le paradoxe de Allais (1955) témoignant d'une surestimation des petites probabilités et d'une sous-estimation des grandes probabilités ou le paradoxe d'Ellsberg (1961) qui met en évidence une préférence pour les situations de risque sur celles d'incertitude (aversion à l'ambiguïté).

Comme Laplace (1825) l'observait déjà, on peut néanmoins combiner l'observation des événements et les autres éléments de connaissance sur les accidents nucléaires majeurs pour réviser ses croyances par un raisonnement bayésien. On peut ainsi se poser la question de savoir si la catastrophe de Fukushima-Daiichi conduit à une révision faible ou forte du risque d'accident, puisqu'on avait observé neuf événements de fusion du cœur d'un réacteur d'importance minimale ou non, avant l'accident japonais, et douze après ! Une étude de révision des probabilités met en évidence **un effet Fukushima-Daiichi de grande ampleur, le risque d'accident majeur devant être significativement révisé à la suite de cette catastrophe**. En particulier, celle-ci a mis en évidence les effets extrêmement négatifs de l'absence d'une autorité de sûreté nationale indépendante, compétente et transparente, alors que cette situation ne se rencontre vraisemblablement pas uniquement au Japon. *A contrario*, la catastrophe de Fukushima-

Daiichi montre que la mise en place partout dans le monde d'autorités de sûreté nucléaire compétentes et reconnue serait un facteur puissant de réduction du risque de nouveaux accidents.

Cependant la probabilité perçue d'accident nucléaire majeur est l'objet de **biais conduisant à des effets de distorsion des choix économiques** (distorsions des choix d'investissements alternatifs, risque de surinvestissement en sûreté) qui ont été observés dans le cas des attentats du 11 septembre 2001, et dont témoigne l'accélération de la sortie du nucléaire en Allemagne :

- événement rare dont la probabilité tend à être surestimée, avec de ce fait une demande d'assurance et de protection excessive ;
- aléa ambigu, conduisant à un biais vers la probabilité la plus haute et le niveau de dommage le plus élevé ;
- événement effroyable conduisant à se focaliser sur l'accident lui-même, sans le mettre en rapport avec d'autres données économiques.

Le raisonnement économique appliqué à la réduction du risque nucléaire montre que les incitations à la prévention des risques passent par trois canaux :

- les **incitations privées** à travers l'effet d'une meilleure sûreté sur l'efficacité économique : elles ne sont certainement pas suffisantes, mais elles ne doivent cependant pas être négligées dans la mesure où l'amélioration de la sûreté diminue les périodes d'arrêt des réacteurs et augmente donc la disponibilité d'une centrale ;
- La **régulation ex post** au travers des règles de responsabilité : elle est insuffisante à la fois en pratique car le plafond de responsabilité est très bas, et en théorie car la responsabilité est limitée par la valeur des actifs de l'opérateur ;
- La **régulation ex ante** : elle est nécessaire du fait des défaillances du marché (notamment l'absence d'assurance et les externalités), mais elle pose des questions multiples : comment fixer l'objectif de sûreté ? Quels instruments utiliser pour l'atteindre ? Comment l'atteindre au moindre coût ?

En conclusion :

- De la même façon que le **vrai** coût de l'accident nucléaire n'existe pas, il n'y a pas de **vraie** probabilité d'accident nucléaire.
- Il convient de calculer les probabilités en combinant les données sur les accidents majeurs observés avec les connaissances des ingénieurs.
- Il est particulièrement important de convaincre les décideurs publics et les autorités de sûreté de ne pas prendre leurs décisions seulement sur la base des probabilités perçues, mais aussi de s'appuyer sur les probabilités calculées par les experts.
- Les réformes institutionnelles et juridiques permettant de mettre en place une **autorité de sûreté nucléaire**, indépendante, compétente, transparente et puissante, offrent un moyen à faible coût d'améliorer la sûreté nucléaire sur la planète.

Echanges avec les participants

Dominique Bureau - La présentation de François Lévêque nous rappelle que passer d'une analyse descriptive à des prescriptions normatives est difficile. Il en ressort quatre interrogations majeures :

- comment la révision des croyances s'opère-t-elle lorsque de nouvelles informations sont disponibles ou quand des événements surviennent ?
- les autorités de sûreté ont-elles les bonnes incitations ?
- le calcul probabiliste est-il pertinent, et en particulier comment manier l'inférence statistique au cas d'événements rares qui nous conduit à la frontière entre le domaine de la prévention et celui de la précaution ?
- que faire des biais de perception du public ?

Alexey Lokof - Comment insérer la corrélation des événements dans les études probabilistes de sûreté ? Convient-il de s'interroger sur la perception des risques par les autorités de sûreté elles-mêmes ?

Meglana Jeleva - L'exposé de François Lévêque montre qu'en matière de risque nucléaire, il s'agit de combiner des informations statistiques disponibles (par exemple sur la base d'un historique d'événements) avec le savoir des ingénieurs. Ceci souligne que les contextes d'incertitude peuvent être très différents selon qu'il s'agit d'un consensus sur le fait que la connaissance des risques est incomplète ou d'un désaccord entre experts. Ces deux types de situations doivent être distingués soigneusement.

Jean-Marc Tallon - La question des biais de perception peut être abordée de plusieurs manières différentes. Par exemple, on peut considérer que les individus transforment les probabilités d'une manière rationnelle, mais distincte des théories en termes d'espérance d'utilité (comme le font notamment les chercheurs qui rationalisent le paradoxe de Allais). On peut aussi considérer qu'il s'agit d'une forme d'irrationalité. Par ailleurs, la question évoquée par François Lévêque d'un éventuel surinvestissement en sûreté dû à des biais de perception pose des questions méthodologiques : quelle fonction de choix social présupposons-nous ? Comment cette fonction agrège-t-elle des croyances hétérogènes sur le risque ?

Yves Marignac - Dans un monde d'incomplétude, face à des écarts entre les fréquences effectives des accidents et les probabilités théoriques calculées par les experts, comment distinguer une anomalie (c'est-à-dire ce qui était considéré comme impossible) d'une simple mauvaise connaissance des probabilités ou d'une erreur dans les modes de calcul de ces probabilités ? La catastrophe japonaise, et même en France l'inondation de la centrale nucléaire du Blayais, montrent que des événements non envisagés peuvent se produire et mettent en lumière les limites de l'approche probabiliste. En d'autres termes, c'est sur la méthode d'évaluation du risque que l'on peut s'interroger. Ramener l'accident de Fukushima à une simple défaillance de l'autorité de sûreté nucléaire japonaise est discutable. Par ailleurs, présenter la décision allemande de sortie du nucléaire comme la conséquence d'un biais de perception des risques procède d'une vision très réductrice.

2. Patrick Momal et Ludivine Pascucci-Cahen - « Le coût du risque extrême : éléments d'analyse microéconomique »

Cette présentation propose quelques éléments d'analyse portant sur l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire. Le cadre d'analyse envisagé est celui d'un « risque élémentaire » noté (x,p) où x désigne la valeur monétaire de l'ensemble des dommages, et p est la probabilité de subir le dommage x . Comme les catastrophes naturelles ou les crises financières, les accidents nucléaires font partie de la catégorie des risques extrêmes caractérisés par une faible probabilité d'occurrence, mais par des conséquences de grande ampleur : x est grand et p est proche de zéro.

Concepts généraux

Il est possible de représenter le processus de décision sur le risque élémentaire (x,p) par une fonction $V(x,p)$ qui fournit la valeur du risque pour le processus de décision considéré. En matière de risque, l'indicateur le plus courant est l'espérance mathématique de perte. Pour un risque élémentaire (x,p) , elle se résume à px , et la valeur du risque peut s'écrire de la manière suivante : $V(x,p) = px \mu(x,p)$.

Un tel multiplicateur μ est la « **valorisation de l'espérance de perte** » (VEP), c'est-à-dire le coefficient par lequel il faut multiplier l'espérance mathématique de perte pour obtenir cette valeur du risque. Ce concept présente l'avantage d'être beaucoup plus directement compréhensible par le décideur et par le public en général qu'une fonction d'utilité.

Pour n'importe quel risque (x,p) , il existe une dépense certaine équivalente, notée y , définie par : $V(y,1) = V(x,p)$. y est la dépense maximum acceptable, le consentement à prévenir, le consentement à payer pour la prévention. Le consentement à prévenir y vérifie : $y \mu(y,1) = px \mu(x,p)$. Le rapport y/px est la quantité $M(x,p) = \frac{\mu(x,p)}{\mu(y,1)}$ par laquelle il faut multiplier px pour obtenir non plus la valeur subjective du risque, mais le consentement à prévenir $y(x,p)$, c'est-à-dire le coût du risque pour le décideur. C'est le « **consentement à prévenir l'espérance de perte** » (CAPEP).

Cas classique de l'espérance d'utilité

Le risque élémentaire (x,p) correspond à une loterie avec deux états possibles du monde : le risque ne se concrétise pas, la richesse initiale w est conservée, ce qui se produit avec une probabilité $1-p$; ou bien le risque se concrétise, la richesse est amputée des pertes x et devient $w-x$, ce qui se produit avec une probabilité p . Dans le cas classique, les situations sont jugées sur la base de l'espérance d'utilité : μ ne dépend que de l'ampleur des dommages x , et il existe une fonction d'utilité de la richesse, notée U , telle que : $EU(x,p) = (1-p) U(w) + p U(w-x)$.

La valeur du risque $V(x,p)$ pour le processus de décision considéré est définie comme la perte d'utilité due au risque (x,p) : $EU(x,p) = U(w) - p[U(w) - U(w-x)] = U(w) - V(x,p)$ avec $V(x,p) = p[U(w) - U(w-x)]$.

En posant $\mu(x) = \frac{U(w) - U(w-x)}{xU'(w)}$ et en normalisant par $U'(w)=1$, il est possible de montrer que représenter le processus de décision sur le risque élémentaire (x,p) par la VEP est équivalent à maximiser une espérance d'utilité selon le modèle de von Neumann – Morgenstern. Il est également possible de montrer qu'autour de zéro $\mu'(0) = \frac{\alpha}{2}$ où $\alpha = \frac{-U''}{U'}$ est l'aversion au risque de Arrow-Pratt.

Ces résultats sont intéressants pour plusieurs raisons. Ils renvoient à la théorie classique des choix en univers risqué (la théorie de l'espérance d'utilité UE), et à sa notion centrale qu'est l'aversion au risque

de Arrow-Pratt. Ils montrent en outre que l'aversion au risque de Arrow-Pratt est radicalement locale autour de $x = 0$. Pour le risque extrême, elle est d'une utilité faible ; Pratt l'avait bien vu qui parlait de « *risk aversion in the small* », précisant que le concept n'apportait rien au-delà. La VEP permet de généraliser le concept d'aversion au risque pour $x \gg 0$. Elle permet également d'enrichir des notions classiques : par exemple, il est possible d'envisager une aversion au risque loin de zéro qui ne soit pas dictée par le comportement autour de zéro.

Au niveau de dommages x , la définition de la VEP implique que la valeur du risque varie localement de la manière suivante :

$$\frac{dV}{V} = \frac{d(px)}{px} + \frac{x\mu' dx}{\mu x} = \frac{d(px)}{px} + a_x(x) \frac{dx}{x}$$

La variation dV/V comprend deux composantes : la variation de l'espérance de perte, à laquelle s'ajoute une variation due à l'accroissement de la gravité x , indépendamment de toute considération de probabilité. La manière dont l'aversion aux dommages $a_x(x)$ varie lorsque x devient très grand traduit l'aversion du décideur aux risques catastrophiques. a_x est donc l'élasticité de la valeur du risque par rapport au niveau des dommages pour des variations risque neutres ; pour des variations quelconques, cette élasticité vaut $1 + a_x$.

Cas général où la valorisation de l'espérance de perte dépend non seulement de x , mais aussi de p

Le cas précédent se généralise de la manière suivante lorsque la VEP dépend à la fois de x et de p :

$$\frac{dV}{V} = \frac{d(px)}{px} + \frac{x\mu' dx}{\mu x} - \frac{p\mu' dp}{\mu p} = \frac{d(px)}{px} + a_x(x, p) \frac{dx}{x} - a_p(x, p) \frac{dp}{p}$$

L'élasticité de la valeur du risque par rapport aux probabilités est de $1 - a_p$, avec $a_p < 1$. Quand a_p est positif, la décision exige des baisses de probabilités plus que proportionnelles pour obtenir une même baisse de la valeur du risque. Ce comportement ne provient pas ici d'une défiance envers les probabilités, mais d'une aversion au risque de dommages graves x . Comme ils ne peuvent être eux-mêmes réduits, la prévention passe par la réduction des probabilités qui se doit donc d'être conséquente. C'est une aversion au risque exprimée au travers des probabilités, ou « aversion au risque au sens de Farmer ».

L'aversion globale au risque au point (x, p) est la quantité $a_x + a_p$. L'approximation du premier degré autour de (x, p) , impliquant des dommages fixes et des probabilités bien localisées, prend a_x et a_p constants localement. L'expression de la valeur du risque est alors, localement : $V(x, p) = K px x^{a_x} p^{-a_p}$, et le coût du risque est la valeur du risque divisée par le coût d'opportunité des fonds $\mu(y, 1)$.

Ces travaux constituent une première approche visant à mettre en lumière la différence de nature entre la prévention des risques faibles pour lesquels l'approximation de Arrow-Pratt est utilisable et la prévention des risques modérés et extrêmes où les préférences du décideur doivent être modélisées de manière totalement différente. Pour approfondir cette question de la prévention des risques extrêmes, il conviendrait d'une part de tenir compte du caractère inter-temporel des choix, avec une contrainte budgétaire, mais aussi d'aller au-delà du modèle d'espérance d'utilité qui apparaît être très réducteur pour traiter de ces questions. L'IRSN souhaiterait y contribuer, en privilégiant les aspects les plus pratiques et appliqués.

Echanges avec les participants

Dominique Bureau - L'exposé de Patrick Momal nous rappelle l'importance, pour évaluer le coût du risque, de bien distinguer l'effet « aversion au risque » de la simple espérance mathématique de dommages. Mais ne devrait-on pas expliciter ce qu'il y a de spécifique dans le cas nucléaire par comparaison avec d'autres risques ? Avons-nous besoin d'une doctrine particulière pour le risque nucléaire ? Par ailleurs, et de manière plus spécifique, certaines valorisations (notamment celle de la vie humaine) tiennent déjà compte de l'aversion au risque des individus et il convient d'éviter les doubles comptabilisations.

Yves Giraud - L'évaluation du risque nucléaire peut correspondre à trois types d'objectifs qu'il convient de bien distinguer : la politique de prévention des risques, les choix de politique énergétique (qui doivent tenir compte de l'ensemble des externalités des différentes filières, et pas seulement de celle associée au risque) et l'indemnisation, elle-même liée à la responsabilité civile nucléaire. Patrick Momal se place délibérément sur le terrain de la prévention des risques, et en considérant des valeurs extrêmes de certains paramètres, notamment l'aversion aux dommages. D'un point de vue pragmatique, d'autres voies sont intéressantes, comme par exemple celle envisagée dans ENEF, consistant à garantir un risque limité en termes de conséquences d'un éventuel accident, c'est-à-dire à limiter les dommages d'un éventuel accident pour éviter une évacuation à long terme de territoires contaminés.

Thierry Schneider - Comment appréhender et mesurer les préférences lorsqu'il s'agit de très petites probabilités, de l'ordre de 10^{-5} ou 10^{-6} ? Quels outils permettent d'éliciter des préférences par des probabilités aussi petites ?

Alexis Louaas - La forme de la fonction d'utilité influence-t-elle la décision de prévention optimale ?

Laurent Joudon - On peut noter une certaine similarité entre le risque nucléaire et d'autres grands risques, comme un choc pétrolier ou une crise financière. Ne pourrait-on pas utiliser ce rapprochement pour mieux appréhender l'aversion au risque quand il s'agit de grands risques ?

3. Geoffrey Rothwell - « Modélisation économique et dommages dus à un accident nucléaire »

Geoffrey Rothwell propose d'examiner le coût du risque d'accident nucléaire en se plaçant dans la perspective de l'économie de l'assurance. Le point de départ d'une telle analyse consiste à définir l'ensemble des paramètres qui conditionnent la demande d'assurance : richesse, fonction qui transforme la richesse en indice de bien-être, probabilité et dommages d'un accident nucléaire, niveau de couverture d'assurance et prime payée. Il convient notamment de catégoriser l'ensemble des dommages selon qu'ils sont sur site ou hors site, radiologiques ou non-radiologiques, et qu'ils affectent les personnes ou des biens.

L'évaluation des coûts et des probabilités a fait l'objet d'une abondante littérature qui remonte aux travaux de Dubin et Rothwell (1990) qui visaient à calculer l'espérance mathématique des coûts d'un accident nucléaire à la suite des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl. Une question essentielle concerne le choix d'une distribution de probabilité adéquate. Dubin et Rothwell (1990) puis Horts et Rothwell (2012) estimaient les paramètres d'une distribution logistique du logarithme des dommages afin d'évaluer, dans le cadre de l'application du Price Anderson Act, l'espérance mathématique du « reste à charge » pour le Congrès américain dans le cas d'un accident nucléaire. Dans le cas d'un accident dont le coût maximal serait de 10 milliards de dollars, l'espérance mathématique de ce reste à charge était négligeable, tandis qu'elle s'élèverait à environ 1 million de dollars par an et par réacteur dans le cas où le coût maximal serait de 500 milliards de dollars.

La question du choix d'une fonction de bien-être et du degré d'aversion au risque est ensuite examinée par Geoffrey Rothwell, en examinant diverses possibilités, notamment celles retenues par Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) et Schieber et Schneider (2002) d'une aversion relative au risque constante, avec une extrême sensibilité du coût social du risque d'accident à la valeur retenue pour cet indice. Par exemple, dans le cas du scénario ST21, le coût social s'obtient en multipliant l'espérance mathématique des pertes par environ 20 dans le cas d'un indice relatif d'aversion au risque égal à 2, mais ce coefficient multiplicateur passe à 378 lorsque l'indice est égal à 3 ! Le choix d'une fonction de bien-être adéquate, et donc d'une mesure de l'aversion au risque, a fait l'objet de nombreux débats, et notamment de critiques dans une perspective de psychologie expérimentale. Ceci reste une question ouverte.

Il reste aussi à définir le montant de la couverture d'assurance qu'une société considère comme adéquate. Dans le cas où il serait possible d'acquérir une couverture d'assurance à prime actuarielle, la théorie économique tend à considérer que c'est la couverture complète qui est la solution optimale. Cependant, nous sommes très éloignés de ce cas car le marché de l'assurance pour couvrir le risque d'accident nucléaire est affecté de nombreuses imperfections, notamment le risque moral et la connaissance imparfaite des probabilités. Le risque moral vient du fait que la disponibilité d'une couverture d'assurance peut accroître les comportements à risque. Geoffrey Rothwell fait remarquer à ce sujet que la disponibilité d'une couverture d'assurance peut être partielle, et que notamment GPU, le propriétaire exploitant de TMI, a été dans une situation de faillite bien que les dommages « hors site » aient été limités. Pour ce qui concerne la connaissance imparfaite des probabilités, il appelle de ses vœux la création d'un groupe interdisciplinaire qui serait chargé de faire progresser les connaissances sur ce sujet.

Geoffrey Rothwell présente en conclusion les principales questions de recherche qui, de son point de vue, devraient être abordées prioritairement :

- l'évaluation comparative des estimations des dommages à la suite des accidents de Three Mile Island, de Tchernobyl et de Fukushima ;
- l'estimation d'une distribution de probabilité des dommages (quelle loi permet d'estimer cette distribution le mieux possible et avec quel rôle pour l'analyse bayésienne ?) ;
- le choix d'une fonction de bien-être social, dépassant l'agrégation des fonctions de bien-être individuelles, en tenant compte du coût social du capital ; l'extension du principe de Arrow-Lind au cas des accidents nucléaires ;
- la conception de mécanismes d'assurance qui tiennent compte de ces perspectives de recherche.

Echanges avec les participants

Dominique Bureau - L'exposé de Geoffrey Rothwell souligne l'intérêt d'une démarche intégrée qui aille de l'évaluation probabiliste des dommages jusqu'à la couverture assurantielle. Il reste que ceci pose la question de la robustesse des résultats obtenus à chaque étape. En particulier, le rôle de la modélisation de la distribution des pertes est tout à fait essentiel, en particulier pour ce qui concerne les valeurs extrêmes (« fat tails »).

Jean-Marc Tallon - Dans les perspectives de recherche dégagées par Geoffrey Rothwell, séparer l'aversion au risque des individus et celle de la société est particulièrement difficile. A ce propos, Jean-Marc Tallon note qu'une littérature récente sur les choix dans l'incertain s'est intéressée à l'agrégation de préférences lorsque les individus ont des désaccords sur les risques auxquels la société fait face, et c'est une approche qui est sans doute pertinente dans le cas du risque nucléaire.

Thierry Schneider - Les travaux du CEPN ont effectivement montré combien le choix d'une fonction d'utilité est crucial. Cependant, au-delà de la modélisation de l'aversion au risque des individus, le cas du risque nucléaire invite à réfléchir au cas d'un risque qui concerne toute une collectivité, et c'est dans ce contexte que devrait être posé la question de la fonction de bien-être social.

François Lévêque - Quel objectif poursuit-on quand on cherche à construire une approche intégrée comme celle que propose Geoffrey Rothwell ?

Yves Giraud - La question des mécanismes d'assurance, présentée par Geoffrey Rothwell comme quatrième axe des perspectives de recherche, est-elle vraiment l'objectif ultime d'une analyse économique du risque nucléaire ? Les exploitants nucléaires préféreraient investir davantage dans la sûreté, plutôt que de payer des primes d'assurance !

Geoffrey Rothwell - En réponse à certaines questions posées, Geoffrey Rothwell précise que la difficulté de modéliser l'attitude des individus vis-à-vis du risque est bien représentée par la large plage de variation des valeurs possibles de l'« indice relatif d'aversion pour le risque », la valeur 2 étant souvent considérée comme raisonnable alors que des valeurs bien plus grandes sont envisageables. En réponse à la question concernant l'intérêt des mécanismes d'assurance, il précise que la recherche d'une assurance optimale et les objectifs de sûreté ne sont pas contradictoires. Il note également l'importance du « peer monitoring » entre exploitants nucléaires, dans le contexte des Etats-Unis.

SESSION 2

LE CALCUL ECONOMIQUE FACE AU RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE

4. Pierre Picard - « Pourquoi et comment internaliser le risque d'accident nucléaire »

Pierre Picard précise que son exposé s'appuie sur un rapport qu'il a rédigé pour l'ASN en 2013, ainsi que sur un travail de recherche en cours (A. Louaas et P. Picard, 2014). Il rappelle en préambule que la productivité de l'électricité d'origine nucléaire est une activité fortement régulée par les Etats, et qu'à ce titre, l'évaluation du coût social qui lui est associé relève du calcul économique public. Il précise aussi que la question « pourquoi internaliser ce coût social ? » a une dimension générale pour l'ensemble des activités à risque (donner de bonnes incitations à la prévention et faciliter l'indemnisation des victimes) et une dimension spécifique au risque nucléaire : y a-t-il quelque chose à internaliser ? Comment le faire ?

Le risque d'accident nucléaire diffère des risques d'accident usuels car ce risque est :

- imparfaitement mutualisable : il s'agit d'événements rares,
- imparfaitement diversifiable : il impacte l'ensemble des acteurs de l'économie et a donc une dimension systémique,
- imparfaitement connu : il a une dimension d'ambiguïté,
- potentiellement catastrophique,
- et peut engendrer des conséquences aléatoires dans le très long terme.

A la question de l'évaluation économique de la prime de risque d'une activité publique parfaitement diversifiable, parfaitement mutualisable et dont les risques présents et futurs sont parfaitement connus et probabilisables, le « théorème de Arrow-Lind » apporte une réponse claire : cette prime de risque est nulle ! Intuitivement, les Etats peuvent répartir leurs risques entre un grand nombre d'individus, de sorte que la prime de risque agrégée (la somme des primes de risque individuelles) est nulle.

Cependant, le théorème de Arrow-Lind ne s'applique pas au risque nucléaire car aucune des hypothèses qui le sous-tendent n'est vérifiée. En d'autres termes, calculer la valeur économique du risque nucléaire sur la base de l'espérance mathématique des dommages associés à un hypothétique accident d'un réacteur, éventuellement rapportée à la valeur de l'électricité produite, a un sens mathématique mais pas de signification économique.

La **mutualisation imparfaite** est une des raisons pour lesquelles le théorème de Arrow-Lind n'est pas pertinent dans le cas du risque nucléaire. C'est un aspect important en pratique car il renvoie à la responsabilité des exploitants et aux mécanismes d'assurance. Les responsabilités des exploitants et des Etats sont régies par des conventions internationales (conventions de Paris et de Bruxelles de 1960 et leurs protocoles de révision de 2004) qui prévoient une responsabilité limitée des exploitants. Du fait de ce transfert de responsabilité vers les Etats, les exploitants bénéficient d'une subvention implicite (une sorte d'engagement hors bilan des Etats).

Un modèle est présenté pour analyser ces questions. Son point de départ est similaire à la démarche suivie par Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) pour évaluer la prime de risque pour l'activité d'un réacteur. On considère les risques associés à un réacteur nucléaire particulier, avec deux catégories d'individus : certains sont situés « à proximité » de la centrale et peuvent être déplacés en cas d'accident, les autres sont situés à une distance suffisante pour que le risque puisse être considéré comme

négligeable. Ces deux catégories d'individus sont susceptibles d'être dans diverses situations possibles (notamment en cas d'accident) qui sont affectées de probabilités. Leur attitude vis-à-vis du risque est modélisée par une fonction d'utilité dite « à indice relatif d'aversion pour le risque constant ». Cet indice est noté γ et il représente l'intensité de l'aversion pour le risque de l'individu. Le cas $\gamma = 2$ est souvent considéré comme une hypothèse raisonnable, mais certains auteurs retiennent des valeurs bien plus élevées. Le modèle conduit ensuite à exprimer la richesse des individus selon la situation dans laquelle ils se trouvent et aussi en fonction de la couverture d'assurance dont ils bénéficient compte tenu des indemnisations que l'exploitant leur attribue dans le cadre de la responsabilité civile nucléaire (RCN).

Différents scénarios de dommages sont envisagés en cas d'accident (celui-ci se produisant avec fréquence de probabilité de 10^{-5} /an dans le scénario de base), avec des effets différenciés sur la santé (décès, maladies) et sur les biens, particulièrement en cas de relogement, le coût total de la catastrophe étant fixé à 200 milliards d'euros. La couverture d'assurance est définie par le plafond de responsabilité T de l'exploitant (700M€ après la révision de la convention de Paris), et les indemnisations sont allouées aux victimes par ordre de priorité en fonction des dommages subis dans la limite du plafond total T . Deux paramètres supplémentaires sont introduits : le taux de chargement λ (coût du traitement des éventuels dossiers d'indemnisation) et surtout μ le **coût de l'allocation de capital contingent** permettant de financer les indemnisations en cas d'accident et passant par les marchés de réassurance et les mécanismes de transfert alternatif des risques. Le niveau optimal de responsabilité T , et donc la couverture d'assurance dont l'exploitant devrait bénéficier, minimise le « coût social du risque nucléaire » qui est ici la somme pondérée des primes de risque des individus appartenant aux deux groupes.

Les calculs effectués montrent que les résultats sont sensibles aux hypothèses faites sur les valeurs des paramètres, particulièrement γ et μ , mais certaines conclusions semblent robustes. En particulier, dans le scénario de base (le plus optimiste du point de vue des conséquences d'un accident similaire à celui envisagé par Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000), le niveau de couverture optimale, c'est-à-dire la valeur optimale de T , est du même ordre de grandeur que la valeur retenue après la révision de la convention de Paris (c'est-à-dire 700M€) si $\gamma = 2$ et si on estime μ en s'appuyant sur le coût du financement du capital contingent disponible pour la couverture de risques catastrophiques à faible probabilité (plus explicitement, les tranches d'obligations catastrophes – *catbonds* – dont le déclenchement est très peu probable, mais affecté d'une certaine ambiguïté). Si $\gamma > 2$ ou dans le cas de scénarios plus graves, alors la valeur optimale de T est nettement plus élevée.

Pour conclure, Pierre Picard note que la couverture optimale du risque nucléaire, et donc son degré souhaitable d'internalisation par l'assurance, dépendent fortement du coût de l'allocation de capital (mesuré par le paramètre μ). Cependant divers **instruments financiers** permettent de réduire ce coût : l'auto-assurance par augmentation de capital et le transfert alternatif des risques. La gestion du risque nucléaire devrait donc être reflétée dans la structure financière des exploitants.

Echanges avec les participants

Yves Marignac - Il est particulièrement important d'évaluer la sensibilité des résultats à la valeur des paramètres. De ce point de vue, Pierre Picard a précisé que les résultats sur la couverture d'assurance optimale dépendent effectivement fortement des paramètres γ et μ , mais qu'ils sont pratiquement indépendants de la valeur retenue pour la fréquence d'accident (qui est de 10^{-5}).

Thierry Schneider - Les données utilisées dans l'article de Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) étaient issues de l'étude ExternE et, pour ce qui concerne les effets sur la santé, ces données s'appuyaient sur une modélisation de la relation dose-effet. Thierry Schneider souligne par ailleurs combien les perturbations de l'ensemble du système économique sont importantes dans l'analyse des conséquences d'un accident nucléaire.

Jean-Michel Béacco - Celui-ci souligne le contexte actuel des marchés financiers, dans lequel la France peut emprunter à 2,5%. C'est une situation particulièrement favorable pour le lancement de cat-bonds.

Dominique Henriot - A partir de quelle valeur du paramètre μ une solution $T > 0$ est-elle optimale ? A cette question, Pierre Picard répond qu'une évaluation de μ extrapolée en partant de données sur les spreads de cat-bonds donne une valeur de T au moins égale à ce qui a été mis en place en France à la suite de la révision de la convention de Paris, et même des valeurs nettement plus élevées lorsque l'indice relatif d'aversion au risque γ est supérieur à 2 ou pour des scénarios plus pessimistes que le scénario de base.

Yves Giraud - La logique de l'analyse présentée par Pierre Picard est de nature purement assurantielle et elle ne permet pas de procéder à une comparaison de filières énergétiques. Par ailleurs, l'hypothèse de 200M € sur le coût global d'un accident peut être discutée. Enfin, la RCN n'est qu'un des mécanismes d'indemnisation en cas d'accident.

Laurent Joudon - Le modèle présenté suppose qu'il n'y ait pas d'indemnisation au-delà du montant T qui limite la responsabilité de l'exploitant. N'est-ce pas restrictif ? A cette question, Pierre Picard répond que l'analyse présentée fait l'hypothèse que les dommages « mineurs » sont uniformément répartis entre les individus, ce qui est une hypothèse plus favorable que ce qui se passerait en pratique. Donc, même s'il est exact qu'on ne retient que la RCN comme fondement de l'indemnisation des victimes, le cadre général retenu limite implicitement le besoin d'indemnisation aux victimes de dommages « majeurs » (décès, maladies graves, relogement).

Matthieu Schuler - L'hypothèse sur le nombre de décès retenue dans le scénario de base (3 000 dans la zone éloignée de la centrale) est-elle réaliste dans la mesure où elle se base sur l'application de la relation linéaire sans seuil – qui est une règle de gestion des risques – à une population importante ? Pierre Picard répond que cette hypothèse est similaire à des hypothèses du même ordre faites dans l'étude ExternE qui, comme cela a été rappelé par Thierry Schneider, s'appuient sur une modélisation de la relation dose-effet.

5. Christian Gollier - « Face aux incertitudes de long terme, comment prendre des décisions socialement désirables ? »

Après l'accident de Fukushima, des doutes se sont exprimés sur l'optimalité du mix énergétique français. En particulier, il a été souligné qu'il conviendrait d'intégrer le coût de la sûreté et le coût du risque dans le coût du kWh électronucléaire. Le besoin d'une optimisation du niveau de sûreté par des investissements ainsi que par l'allongement ou le raccourcissement de la durée de vie des centrales a été rappelé. Dans ce contexte, il convient de mettre en balance risque nucléaire et risque climatique.

Stern (2006) a procédé à une estimation des coûts du risque climatique. Il a évalué les pertes annuelles dues au changement climatique à l'horizon 2200 à 14% du PIB mondial de 2010, c'est-à-dire $0,14 \times 63 = 9$ trillions de dollars par an. Par comparaison, si on envisage l'hypothèse d'un accident nucléaire dont le coût serait de 500 milliards de dollars, se produisant avec une probabilité de 1% par an, la perte en espérance mathématique n'est que 5 milliards de dollars, ce qui est considérablement plus faible que les 9 trillions de dollars du réchauffement climatique, tels qu'évalués dans le rapport Stern ! Présenté différemment, on peut considérer que les 5 milliards d'espérance mathématique de perte annuelle sont à mettre en rapport avec une production d'électricité mondiale d'origine nucléaire de 2 500 milliards de kWh et conduiraient à augmenter le coût social de l'électricité de 0,2 centime/kWh. Dans le rapport Stern, le coût social de la tonne de CO₂ est de l'ordre de 80 euros, la meilleure technologie de production d'électricité au gaz émet 400 grammes de CO₂ par kWh produit. En conséquence, le risque climatique accroît le coût social de l'électricité d'environ 3,2 centimes/kWh. Ceci conduit donc à fortement relativiser le risque nucléaire face au risque climatique.

Christian Gollier souligne aussi la difficulté d'estimer une probabilité d'accident : 40 ans de technologie civile nucléaire suffisent-ils pour calibrer à 10^{-5} par centrale et par an la probabilité d'un accident ? Il cite notamment une étude de Hofert et Wüthrich (2011) dans laquelle les auteurs estiment une loi de Pareto, les paramètres estimés impliquant une espérance de dommages infinis.

Face à ces incertitudes, il convient de retenir un « **principe de précaution raisonné** » qui prendrait en compte les éléments suivants :

- la plus ou moins grande efficacité des mécanismes d'assurance,
- l'aversion à l'ambiguïté, à la fois intrinsèque et affectée par un apprentissage des probabilités dans un contexte dynamique,
- la prise en compte de valeurs d'option, à la fois pour la préservation du savoir-faire et pour le « learning by doing »,
- les biais de croyance, que ce soit vers le pessimisme ou vers l'optimisme.

En conclusion, Christian Gollier souligne qu'en l'absence de technologie d'énergie renouvelable mature, il convient de choisir entre deux maux : le risque nucléaire et le risque climatique, le second étant d'un ordre de grandeur bien plus grand que le premier. C'est cependant une conclusion qui mériterait d'être affinée, car on en sait aujourd'hui beaucoup plus sur le risque climatique que sur le risque nucléaire.

Echanges avec les participants

Dominique Bureau - L'exposé de Christian Gollier met l'accent sur l'importance d'une analyse comparative des risques et de leurs dépendances, et c'est effectivement une question centrale. Par ailleurs, le risque nucléaire ne peut être pris en compte que dans le cadre général des choix de politique énergétique.

Patrick Momal - Le fait que les coûts associés au risque climatique soient plus élevés que l'espérance du coût du risque nucléaire est probablement indubitable, même si les coûts d'une catastrophe nucléaire sont évalués de manière très approximative. Cependant, on se trompe quand on oppose risque climatique et risque nucléaire. Les évaluations de coût n'ont d'intérêt que lorsqu'on a une décision à prendre, ce qui rend délicate la comparaison entre le coût du changement climatique (qui est un problème mondial) et le coût du risque nucléaire pour lequel les décisions sont prises pays par pays et qui n'est donc pas un problème mondial. Par ailleurs, les valeurs moyennes ont peu d'utilité pour évaluer le coût du risque nucléaire : ce qui compte pour un risque extrême comme le risque nucléaire, ce ne sont pas des valeurs moyennes, mais c'est le choc que représente un accident pour le pays concerné. Il n'est pas souhaitable de faire croire que le risque disparaît parce que beaucoup de kWh sont produits !

Michel Spiro - Le risque climatique constitue-t-il un événement extrême ? Ce n'est pas clair, et la comparaison avec le risque nucléaire est de ce point de vue délicate. Par ailleurs, le risque climatique se pose de manière progressive tandis que le risque nucléaire est ponctuel, à la fois géographiquement et temporellement. Il s'agit donc de deux risques très différents.

Yves Marignac - La comparaison entre risque nucléaire et risque climatique est incompréhensible. Les répartitions temporelles et géographiques de ces risques sont différentes. De plus, on ne peut pas considérer qu'il y a un « trade-off » entre ces deux risques. En effet, au-delà de la perspective française pour laquelle, compte tenu de l'importance du parc nucléaire, la question de la contribution de la production d'électricité d'origine nucléaire aux émissions de gaz à effet de serre française se pose effectivement, la consommation d'électricité d'origine nucléaire ne représente qu'une petite fraction de la consommation énergétique mondiale (2,5% contre plus de 80% pour les énergies fossiles). Un éventuel trade-off, en plus d'être en dehors des horizons temporels étudié par le GIEC, supposerait une augmentation du nombre de réacteurs nucléaires dans le monde, accompagnée d'un très fort accroissement des risques. Pour traiter de ces questions, on ne peut pas s'abstraire des données chiffrées fournies par les agences internationales. Ainsi un rapport récent de l'Agence internationale pour l'énergie (AIE) montre que, sur la période 2000-2013, les investissements annuels dans les énergies renouvelables électriques ont été en moyenne de 150 milliards d'euros, pour 8 milliards d'euros pour les investissements annuels dans le nucléaire. Par ailleurs, l'IRENA a indiqué que, pour la première fois l'an dernier, les nouvelles capacités installées en énergies renouvelables ont été supérieures aux nouvelles capacités installées en énergies fossiles et nucléaires cumulées. Il s'agit donc d'une évolution nette.

SESSION 3

BILAN ET PERSPECTIVES

Dominique Bureau - Les présentations et échanges très fructueux de cette journée montrent qu'il convient de faire progresser la réflexion à la fois sur l'évaluation des coûts d'une catastrophe nucléaire (par exemple le nombre de victimes) et aussi sur des questions plus spécifiques liées à des décisions à prendre (par exemple le montant souhaitable de couverture d'assurance des exploitants).

Les interventions sont regroupées ci-dessous en commençant par celles qui portent sur des questions de méthode et en poursuivant par celles qui concernent la perspective générale de l'étude du risque nucléaire dans sa dimension économique.

Questions de méthode

Meglana Jeleva - Sur un plan technique, il a été souligné combien l'aversion au risque (calculée par exemple par l'indice relatif d'aversion au risque) est un facteur déterminant du coût social du risque nucléaire. Cependant, n'oublions pas que cette aversion au risque dépend de multiples facteurs : le contexte de la décision (par exemple, selon qu'il s'agit d'effectuer des choix de portefeuille ou d'autres choix, l'aversion au risque d'un même individu pourra ne pas être la même) et les caractéristiques du décideur. Par ailleurs, l'aversion au risque peut évoluer dans le temps ; il s'agit donc d'un paramètre difficile à appréhender. Par ailleurs, l'apport méthodologique des économistes ne devrait pas être minimisé car les modèles d'analyse de la décision dans des situations d'incertitude se sont beaucoup développés au cours des dernières décennies : s'agit-il d'un contexte d'informations précises ou imprécises, conflictuelles entre experts ou unanimes, avec des décisions séquentielles ou instantanées, en connaissant les conséquences des choix de manière précise ou imprécise... Toute cette diversité a été appréhendée dans l'analyse récente des choix dans l'incertain et certains de ces aspects sont sans doute pertinents pour appréhender la question du risque nucléaire. Enfin, les échanges au cours de la journée ont souvent porté sur la question de la prévention, qu'il s'agisse de la réduction de la probabilité d'un accident ou de la réduction des dommages en cas d'accident. La question de la perception des risques est un élément essentiel de cette question de la prévention, dans la mesure où elle conditionne les choix qui sont effectivement faits.

Jean-Marc Tallon - L'analyse économique propose des manières de traiter les situations où les probabilités sont imparfaitement connues. Il y a bien plus de débats sur la manière de représenter les préférences des individus par une fonction d'utilité. Par exemple, faut-il partir d'une situation de référence représentant un *statu quo* ou est-il préférable d'envisager un ensemble de fonctions d'utilité ?

Christian Gollier - Il est intéressant de noter combien des modifications de modélisation d'apparence anodine peuvent affecter fortement l'analyse des risques extrêmes. Par exemple, dans des modèles d'équilibre des marchés financiers, le fait de remplacer la loi normale par une loi de Student peut conduire à faire « exploser » la prime de risque. Par ailleurs, il est important de rechercher la cohérence des décisions publiques, et donc de retenir la même valeur de paramètre d'aversion au risque (l'indice γ) pour traiter du risque nucléaire, du risque climatique ou de tout autre risque.

Patrick Momal - En réponse à Dominique Bureau, Patrick Momal rappelle que l'IRSN a effectué des études sur les conséquences économiques d'un accident nucléaire majeur et il en ressort que les principales composantes du coût d'un accident ne sont pas associées à des conséquences radiologiques, mais plutôt à la capacité de résilience du pays. Par ailleurs, il souligne aussi que les travaux de Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) invitent à progresser dans la modélisation de l'aversion au risque en cas de risque extrême, que ce soit au niveau de l'attitude individuelle que du point de vue de la perception collective.

Perspectives générales

François Lévêque - L'ASN devrait préciser quels sont ses objectifs quand elle invite à réfléchir sur l'évaluation économique du risque nucléaire. Un des objectifs devrait être de développer une analyse économique des politiques de sûreté et de prévention. De plus, il faut rappeler que les économistes ont besoin de données pour pouvoir travailler. Il est particulièrement regrettable qu'ils n'aient pas accès aux données sur les incidents qui affectent les centrales.

Jean-Christophe Niel - La question de l'analyse économique du risque nucléaire est « sur la table », qu'il s'agisse de l'évaluation des coûts d'un accident dans une perspective post-accidentelle, de l'indemnisation et de l'assurance ou des coûts de la prévention. L'ASN ressent un besoin de confrontation des points de vue sur l'ensemble de ces questions.

Michel Spiro - Les risques d'accident nucléaire sont étudiés par l'ASN selon des points de vue variés et complémentaires, qu'il s'agisse de répertorier les accidents ou de connaître les facteurs d'incertitude affectant la sûreté et la manière d'en réduire la probabilité et l'impact.

Jacques Lochard - A la fin des années 90, un rapport allemand avait conduit au rapport ExternE de la Commission Européenne, puis à l'étude de Eeckhoudt, Schieber et Schneider (2000) qui a été citée. Il semble que le dossier ait peu progressé depuis le début des années 2000. Par ailleurs, les accidents de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima montrent qu'il est très difficile d'évaluer les coûts d'une catastrophe nucléaire. Evaluer ces coûts dans le détail, est particulièrement important, mais c'est une opération rendue délicate à la fois par la complexité des situations post-accidentelles et par l'importance des effets macroéconomiques difficiles à mesurer. Par exemple, les milliards dépensés par l'Etat pour la décontamination ou la surveillance médicale vont conduire à des impôts et à des investissements, et font travailler des milliers de personnes avec des effets sur le commerce extérieur, de sorte que calculer les coûts globaux est délicat. Qu'est-ce que les économistes peuvent apporter sur cette question ? Il reste beaucoup à faire pour analyser et comprendre les conséquences économiques d'un accident, la situation actuelle au Japon montre que la société est affectée de multiples manières et qu'il est difficile de les appréhender de façon synthétique. Sur le coût des accidents, il faut donc à la fois progresser dans la direction académique qui est très importante et dont les présentations d'aujourd'hui ont bien montré l'intérêt, mais aussi dans la direction appliquée, ce qui est aujourd'hui facilité par le fait que le Japon est un pays où les données sont accessibles assez facilement. Les données sur lesquelles les économistes se basent pour parler d'indemnisation sont encore très ténues et il est important de progresser dans l'analyse concrète du coût d'un accident nucléaire.

Yves Maignac - Plusieurs interventions, notamment celle de François Lévêque, ont montré qu'il est indispensable de réexaminer les fondements du calcul de la probabilité d'un accident nucléaire et, en conséquence, de s'interroger sur d'éventuelles faiblesses de la doctrine de sûreté. François Lévêque a aussi évoqué l'écart entre l'état supposé des installations et leur état réel, et c'est aussi une dimension à prendre en compte dans la sûreté nucléaire, car l'hypothèse de conformité aux règles n'est pas nécessairement vérifiée dans tous les cas. Les analyses économiques qui ont été présentées dans une perspective assurantielle ont paru pertinentes. Deux questions méritent cependant d'être davantage creusées. D'une part, et ceci a été développé par Jacques Lochard, on ressent un fort besoin d'une meilleure connaissance des dommages potentiels d'un accident nucléaire (et le travail de l'IRSN fournit une base qui mérite d'être approfondie et discutée quant aux scénarios et aux conséquences territoriales prises en compte) et des coûts de la prévention avec un bilan coûts-bénéfices des décisions de sûreté. Les travaux des économistes dans ce domaine sont très importants, mais il convient de bien les relier aux

travaux effectués dans le domaine de la sûreté. Par exemple, rapprocher des événements de type fusion d'un assemblage combustible et des événements de type fusion partielle ou totale d'un cœur de réacteur nucléaire, tel que ceci a été fait par François Lévêque dans sa présentation, n'est peut-être pas totalement pertinent. L'ASN est complètement dans son rôle en favorisant des travaux qui traitent des liens entre sûreté et analyse économique, mais il serait sans doute utile de relier ces initiatives avec celles de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) afin de croiser les expertises. Par ailleurs, rappelons que chaque type d'énergie présente certains risques et qu'il est difficile de les hiérarchiser.

Geoffrey Rothwell - Il est important de bien définir les termes d'un langage commun, notamment pour bien distinguer ce qui relève du domaine des actions *ex ante*, c'est-à-dire d'une analyse coûts-bénéfices sur les risques, et ce qui relève des actions *ex post*, notamment la couverture d'assurance.

Matthieu Schuler - Du point de vue de l'IRSN, il n'y a que des avantages à ajouter la dimension de l'analyse économique aux prismes usuels de la sûreté que sont l'ingénierie, la radioprotection ou la biologie. Il y a aussi un grand intérêt à pouvoir décomposer par catégories (ou familles) les coûts d'un accident et de disposer ainsi de leurs ordres de grandeurs respectifs, comme ceci a été fait dans les travaux de Patrick Momal à l'IRSN. Cela permet de constituer un guide pour l'action des décideurs en situation de gestion accidentelle puis post-accidentelle. Ceci rejoint d'ailleurs les préoccupations exprimées par Jacques Lochard. Par ailleurs, la question des biais de perception est particulièrement importante et elle est reflétée dans le Baromètre annuel de la perception des risques édité chaque année par l'IRSN sur la base d'un sondage mené auprès de la population française et dont l'exploitation scientifique pourrait être élargie à d'autres acteurs qui s'y intéressent. Enfin, il serait important de mieux relier la question de l'indemnisation et de l'assurance à celle de la gouvernance des risques, et notamment de comprendre dans quelle mesure la première est susceptible d'affecter la seconde.

Yves Giraud - La question du coût d'un accident nucléaire fait actuellement l'objet d'un travail de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) portant à la fois sur les données et sur les méthodes dans une perspective internationale ; dans l'attente du rapport qui est en préparation, il n'est peut-être pas utile d'en faire davantage pour l'instant. Par ailleurs, concernant l'évolution de la RCN, rappelons que la loi de transition énergétique devrait acter le changement du niveau de responsabilité des exploitants qui résulte de la révision de la convention de Paris ; à court terme, il semble difficile de changer à nouveau les conditions de responsabilité des exploitants avec un autre seuil de responsabilité ; faisons déjà le pas qui a été décidé. Par ailleurs, plusieurs intervenants ont souligné à juste titre l'importance d'une réflexion théorique sur l'évaluation économique du risque nucléaire, mais ils ont aussi noté toutes les limites des instruments méthodologiques dont nous disposons, qu'il s'agisse de la détermination des probabilités d'accident, de l'hétérogénéité du parc, des exploitants et des autorités de sûreté. Dans ce contexte, à titre de suggestion personnelle, pourquoi ne pas essayer de mettre en évidence de manière consensuelle les limites de ces exercices d'analyse économique des risques ? Enfin, développer des travaux de recherche sur la prévention des risques serait utile, mais faut-il faire porter l'effort sur la réduction de la probabilité ou des coûts d'un accident, ou sur la gestion post-accidentelle ?

Patrick Momal - Un besoin d'une meilleure confrontation des questions de gestion du risque et de stratégie industrielle et de coût se fait ressentir. L'EPR en est un exemple puisqu'il réduit le risque de vieillissement, mais qu'il conduit à des coûts d'investissement supplémentaires. Les ministères de l'environnement d'un côté, des finances et de l'industrie de l'autre, mettent l'accent sur l'une ou l'autre question, mais la discussion sur les arbitrages entre ces deux aspects ne trouve pas de lieu où s'exprimer.

Thierry Schneider - En réaction à l'intervention précédente de Patrick Momal, les postures semblent avoir évolué depuis la catastrophe de Fukushima. En particulier, il y a de vraies possibilités de coopération entre administrations dans des domaines comme la radioprotection et la gestion des produits contaminés. Il reste que la question de la valorisation monétaire de la disponibilité à payer pour une réduction des risques est une question qui reste ouverte.

Véronique Decobert - L'ASN ne devrait-elle pas prendre des initiatives au niveau européen, en lien avec ENEF (European Nuclear Energy Forum) ? A cette question, Jean-Christophe Niel répond que la priorité est d'abord pour l'ASN de faire progresser sa propre doctrine, en lien avec l'AEN, ce qui est un des objectifs du séminaire, mais qu'il faut effectivement pouvoir converger.

Clôture du séminaire

Jean-Christophe Niel

Ce séminaire avait deux objectifs : d'une part organiser un débat sur l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire, en réunissant des personnalités que l'ASN n'a pas l'habitude de rencontrer ; ce premier objectif a été pleinement atteint et a mis en avant un manque d'échanges entre les spécialistes de sûreté nucléaire et les économistes, avec notamment une interrogation sur les données disponibles et des demandes d'accès à ces données ; d'autre part, identifier des axes de recherche et des sujets sur lesquels il faudrait travailler et qui devraient être considérés comme prioritaires pour l'évaluation économique du risque d'accident nucléaire.

Il est difficile de proposer une synthèse exhaustive de ce qui ressort des présentations et des échanges ; néanmoins quelques sujets émergent. D'abord, la question des données, déjà mentionnée, est revenue à plusieurs reprises : quelles données sont importantes pour la recherche ? Comment les partager ? Quelles données nouvelles devraient être rassemblées, notamment liées à la catastrophe de Fukushima ? Comment évaluer le coût d'un accident nucléaire ? Au-delà de la question des données, plusieurs questions apparaissent : celle de l'évaluation de la probabilité d'accident et de son évolution en fonction des changements de technologies ; celle des écarts entre les anticipations du risque d'accident et la réalisation effective de certains événements, et aussi celle de la perception des risques. Un autre sujet rassemble toutes les interrogations sur l'aversion aux risques catastrophiques. Le risque nucléaire nous conduit à réfléchir sur les risques extrêmes. Un rapprochement avec d'autres risques extrêmes serait intéressant à approfondir, comme par exemple le risque de crise financière comme cela a été suggéré. Ceci rejoint une troisième catégorie de sujets qui concernent la modélisation de l'attitude vis-à-vis du risque, notamment le choix d'une fonction d'utilité et la mesure de l'aversion au risque. Un quatrième groupe de sujets rassemble tout ce qui concerne les mécanismes d'assurance, dans une perspective soit d'indemnisation soit de financement de ces mécanismes. Enfin, le rôle du régulateur et de ses imperfections a été peu abordé au cours du séminaire, mais il renvoie à un ensemble de questions intéressantes et importantes pour la politique de sûreté nucléaire. L'industrie nucléaire est très régulée et très contrôlée et le régulateur ne peut pas être considéré comme totalement neutre dans le processus qui encadre la production d'électricité nucléaire.

Tout ceci n'est pas une liste exhaustive, et il existe bien d'autres questions qu'il faudrait approfondir en associant les chercheurs en économie, d'une manière transparente et pluraliste, et les spécialistes de sûreté. Ce sera dans l'avenir un objectif de l'ASN que de favoriser de telles recherches et interactions.

Ordre du jour

10h00 Ouverture de la journée - Introduction

Jean-Jacques Dumont, commissaire, Autorité de sûreté nucléaire

Jean-Christophe Niel, directeur général, Autorité de sûreté nucléaire

Session 1 : Analyse économique du risque d'accident nucléaire

Présidents : Jean-Christophe Niel – Dominique Bureau

10h15 Le risque d'accident nucléaire : quels apports de l'analyse économique

François Lévêque, professeur à l'Ecole des Mines de Paris

Questions

11h00 Coût du risque extrême : éléments d'analyse microéconomique

Patrick Momal – Ludivine Pascucci-Cahen, Laboratoire d'économie, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

Questions

11h45 Economic modelling and nuclear accident damage

Geoffrey Rothwell, principal economist à l'Agence pour l'énergie nucléaire

Questions

12h30 *Pause déjeuner*

Session 2 : Le calcul économique face au risque nucléaire

Présidents : Jean-Christophe Niel – Dominique Bureau

14h00 Le risque d'accident nucléaire : pourquoi et comment l'internaliser ?

Pierre Picard, professeur à l'Ecole Polytechnique

Questions

14h45 Face aux incertitudes de long terme, comment prendre des décisions socialement désirables ?

Christian Gollier, professeur à Toulouse School of Economics

Questions

Session 3 : Bilan et perspectives

Présidents : Jean-Christophe Niel – Dominique Bureau

15h30 Echanges avec la salle

Evaluer le coût économique du risque d'accident nucléaire : questions ouvertes et pistes de recherche

17h00 Clôture de la journée

Liste des participants

Jean-Michel BEACCO
Institut Louis Bachelier

Romain BIZET
Ecole des Mines-
Paristech

**Hélène BRUNET-
LECOMTE**
MEDDE/DGEC

**Dominique
BUREAU**
Conseil Economique
pour le Développement
Durable

Lucie CASTETS
MEFI/DG TRESOR

**Maurice
CORRIHONS**
Caisse centrale de
réassurance

Anna CRETI
Université Paris-
Dauphine

**Véronique
DECOBERT**
Westinghouse

**Jean-Claude
DELALONDE**
ANCCLI

Michel DEMET
ANCCLI

**Jean-Jacques
DUMONT**
ASN

Bernard DUPRAZ
ASND

Yves GIRAUD
EDF

Jean-Luc GODET
ASN

Christian GOLLIER
Toulouse School of
Economics

**Dominique
HENRIET**
Ecole Centrale de
Marseille

Emeric JANNET
Areva

Meglana JELEVA
Université Paris-Ouest
Nanterre-La Défense

Laurent JOUDON
EDF

Isabelle JUBELIN
Fonds pour la
recherche AXA

Maxime KOPEC
MEDDE/DGEC

Reza LAHIDJI
HEC

François LEVEQUE
Ecole des Mines-
Paristech

Yves LHEUREUX
ANCCLI

Jacques LOCHARD
CEPN

Alexey LOKOF
OCDE/AEN

Alexis LOUAAS
Ecole Polytechnique

**Charles-Antoine
LOUET**
MEDDE/DGEC

Yves MARIIGNAC
Wise Paris

Frédéric MARIOTTE
CEA

Thomas MIEUSSET
ASN

Patrick MOMAL
IRSN
Laboratoire
d'économie

Philippe MONGIN
CNRS

Jean-Christophe NIEL
ASN

Ludivine PASCUCCI-CAHEN
IRSN
Laboratoire
d'économie

Marie-Line PERRIN
ASN

Michaël PETITFRERE
ASN

Pierre PICARD
Ecole Polytechnique

Xavier POUGET-ABADIE
EDF

Daniel QUENIART
IRSN

Geoffrey ROTHWELL
OCDE/AEN

Gilles ROTILLON
Université Paris 10-
Nanterre

Thierry SCHNEIDER
CEPN

Matthieu SCHULER
IRSN

Ingmar SCHUMACHER
IPAG

Michel SCHWARZ
ASN
Comité scientifique

Roger SPAUTZ
Greenpeace

Michel SPIRO
ASN
Comité scientifique

Eric STROBL
Ecole Polytechnique

Michel SUIN
Assuratome

Jean-Marc TALLON
CNRS-Université
Paris 1

Margot TIRMARCHE
ASN

Josquin VERNON
MEFI

Alain VICAUD
EDF

Bertrand VILLENEUVE
Université Paris-
Dauphine

Andrew WHITE
OCDE/AEN